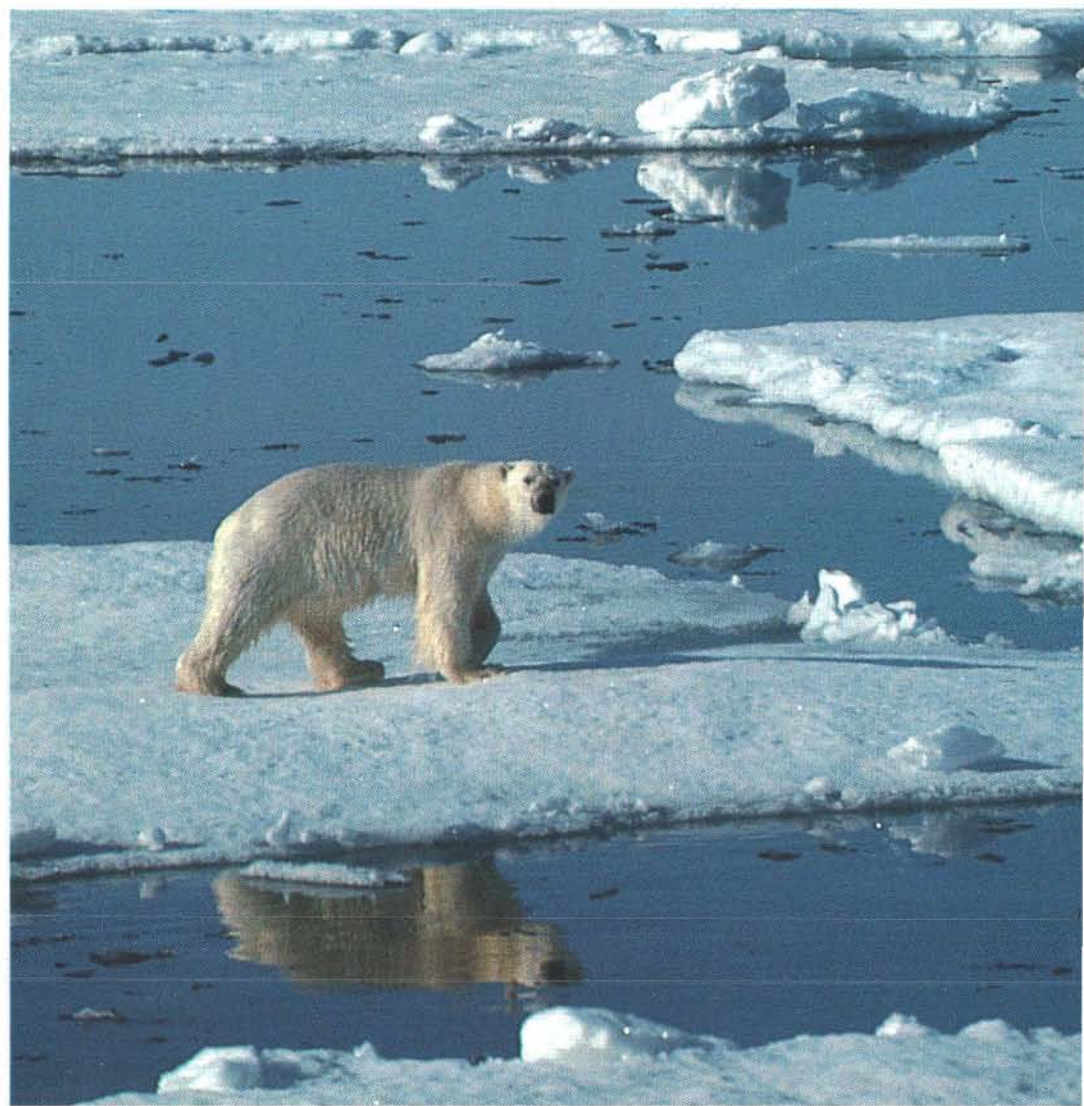


2 | 58<sup>e</sup> jaargang

# NATUUR '90 & TECHNIEK

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



**BROEIKASEFFECT/** REGELGENEN/FUSIE-ONDERZOEK/  
ZWEMMEN OF ZINKEN/HET UUR NUL/MARMER

## WERKEN IN HET BUITENLAND

Wil U van leven veranderen? Zoekt u werk in het buitenland? Zie hier het boek dat u nodig hebt. U vindt er alle inlichtingen in terug evenals de adressen van meer dan 1.000 ondernemingen en uitzendbureau's.

Tegelijkertijd nemen wij de vrijheid u dit boek voor te stellen als een onontbeerlijk middel voor allen die werk zoeken. Alles staat er in, van de werkaanvraag over het arbeidscontract, informatie over de arbeidsvergunning, visa, tot het klimaat, salaris-niveau en verblijfsvoorwaarden in Europa, de Verenigde Staten, Canada, de Antillen en het Verre Oosten.

Geïnteresseerd? Vraag schriftelijk onze gratis brochure aan die u meer inlichtingen zal bezorgen, op het hieronder vermelde adres. Duid daarbij met een kruisje het juiste vak aan:

☐ Boek 'Arbeit im Ausland'. Prijs: f 59,-. ☐ Gratis brochure.

Indien het de brochure is die u interesseert verzoeken wij u om aan uw brief een aan uzelf geadresseerde enveloppe toe te voegen die een internationale frankerings-coupon bevat.

**SH BOKFÖRLAG AB** Box 2014  
S-135 02 Tyresö Zweden.

N.B. Wij zijn geen uitzendbureau!

## WEIZMANN INSTITUUT VAN WETENSCHAPPEN INTERNATIONAAL WETENSCHAPPELIJK VAKANTIEKAMP 4 juli - 5 augustus 1990

Het Internationaal Wetenschappelijk Vakantiekamp van het Instituut biedt jaarlijks aan een beperkt aantal eindexaminandi de gelegenheid, gedurende de zomervakantie enige tijd in internationaal verband aan wetenschappelijk onderzoek te wijden. Hiertoe wordt voor hen door medewerkers van het Weizmann Instituut een programma georganiseerd bestaande uit colleges, praktisch werk en excursies in Israël.

Het vakantiekamp is bestemd voor **Nederlandse eindexaminandi VWO** van 17-18 jaar. Kandidaten dienen een uitgesproken belangstelling te hebben voor exakte wetenschappen, de Engelse taal zeer goed te beheersen en goed te kunnen samenwerken. De beurzen voor het Wetenschappelijk Vakantiekamp omvatten de kosten van verblijf en activiteiten in Israël. In de reiskosten dient zelf te worden voorzien.

Aanmeldingsformulieren zijn tot 7 april 1990 verkrijgbaar bij het Nederlands Comité van het Weizmann Instituut van Wetenschappen. Postbus 71043, 1008 BA Amsterdam.



# NATUUR '90 & TECHNIEK

Losse nummers:  
f 10,95 of 215 F.

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



## Bij de omslag

Als door het broeikaseffect de temperatuur op Aarde stijgt, zal het ijs op de polen waarschijnlijk smelten. Dat vormt niet alleen een bedreiging voor de ijsbeer die in het noordpoolgebied leeft. Ook de zeespiegel zal stijgen, met alle gevolgen vanden voor (onze) lage landen. Over de moeilijk voorspelbare gevolgen van het broeikaseffect gaat het artikel op pag. 94 e.v.

(foto: Photo Researchers Inc., New York)

Hoofdredacteur: Th.J.M. Martens.

Adj. hoofdredacteur: Dr G.M.N. Verschuuren.

Redactie: Drs G.F.M. Hendrickx,

Drs T.J. Kortbeek, Drs R.W. van Nues.

Redactiesecretaresse: R.A. Bodden-Welsch.

Onderwijscontacten: W.H.P. Geerits, tel.: 04759-1305.

Redactiemedewerkers: Drs J. Bouma, Drs G.P.Th. Kloeg,

A. de Kool, Prof dr H. Lauwerier, Drs J.C.J. Masschelein, Ir S. Rozendaal, Dr J. Willems.

Wetenschappelijke correspondenten: Ir J.D. van der Baan, Dr P.

Bentvelzen, Dr W. Bijleveld, Dr E. Dekker, Drs C. Floor, Dr L.A.M.

v.d. Heijden, Ir F. Van Hulle, Dr F.P. Israel, Drs J.A. Jasperse,

Dr D. De Keukeleire, Dr F.W. van Leeuwen, Ir T. Luyendijk,

Dr P. Mombaerts, Dr C.M.E. Otten, Ir A.K.S. Polderman, Dr J.F.M.

Post, R.J. Querido, Dr A.F.J. v. Raan, Dr A.R. Ritsema, Dr M. Sluy-

ser, Dr J.H. Stel, J.A.B. Verduijn, Prof dr J.T.F. Zimmerman.

Redactie Adviesraad: Prof dr W.J. van Doorenmaalen, Prof dr W. Fiers, Prof dr H. van der Laan, Prof dr ir A. Rörsch, Prof dr R.T. Van de Walle, Prof dr F. Van Noten.

De Redactie Adviesraad heeft de taak de redactie van Natuur en Techniek in algemene zin te adviseren en draagt geen verantwoordelijkheid voor afzonderlijke artikelen.

Vormgeving: H. Beurskens, J. Pohlen, M. Verreijt.

Druk.: VALKENBURG OFFSET BV, Echt (L.). Tel.: 04754-81223.

Redactie en administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland: Postbus 415, 6200 AK Maastricht. Tel.: 043-254044.

Fax: 043-216124.

Voor België: Boechtstraat 15, 1860-Meise. Tel.: 00-3143254044.

Fax: 00-3143216124.

**EURO**  
ARTIKEL

Artikelen met nevenstaand vignet resulteren uit het EURO-artikelen project, waarin NATUUR EN TECHNIEK samenwerkt met ENDEAVOUR (GB), LA RECHERCHE (F), BILD DER WISSENSCHAFT (D), SCIENZA E TECNICA (I), PERISCOPIO TIS EPISTIMIS (GR) en MUNDO SCIENTIFICO (E), met de steun van de Commissie van de Europese Gemeenschappen.



Gehele of gedeeltelijke overname van artikelen en illustraties in deze uitgave (ook voor publikaties in het buitenland) mag uitsluitend geschieden met schriftelijke toestemming van de uitgever en de auteur(s).

Een uitgave van

ISSN 0028-1093



**Centrale uitgeverij en adviesbureau b.v.**

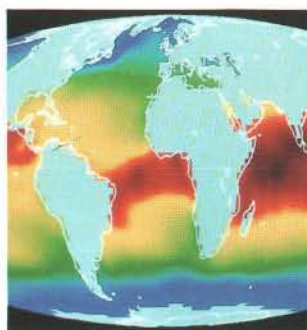
# INHOUD

SIMULATICA Griepgolven	X
AUTEURS	XII
(Geen) fusie	93

<b>ONGEWISSE OPWARMING</b>	94
----------------------------	----

Onvoorspelbare gevolgen van het broeikas  
**E.J. Barron**

De voorspellingen over de opwarming van de Aarde klinken apocalyptisch. Halverwege de volgende eeuw zal een dikke deken van vervuilde lucht de hemel hebben bedekt. De isolerende werking van de atmosfeer, die van nature al werkt als een broeikas, zal hierdoor nog worden versterkt. De gassen die als gevolg van menselijke activiteit in de lucht terechtkomen, zullen de Aarde enkele graden opwarmen, wat zal leiden tot een klimaatverandering die even ingrijpend is als die tijdens de laatste ijstijd. Alleen zal de Aarde deze keer niet op een ijskast maar op een dorre broeikas lijken.



<b>REGELGENEN</b>	106
-------------------	-----

Managers van de celdifferentiatie  
**W. Frese en P. Gruss**

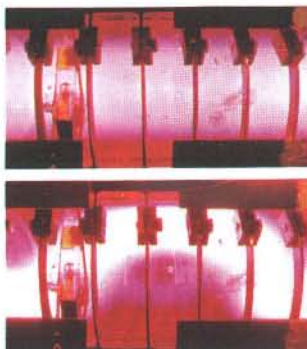
Hoe ontstaat uit een bevruchte eicel uiteindelijk een volledig organisme met talrijke verschillende cellen? Bij dit probleem van de embyogenese gaat het om de genen die deze normale ontwikkeling reguleren, de regelgenen, waarvan de structuur en de functie tot nu toe alleen bij fruitvliegjes bekend waren. Men wil de rol van de regelgenen nu ook bij muizen ophelderen. Dat kan door een techniek waarmee genen, die tevoren doelbewust zijn veranderd, kunnen worden binnengesmokkeld in de geslachtscellen van een muis.



<b>ZON OP AARDE</b>	118
---------------------	-----

Trends in fusieonderzoek  
**A.J.H. Donné en A.A.M. Oomens**

Met de ontdekking van het koude fusieproces in maart 1989 leek een onuitputtelijke energiebron binnen handbereik. Per kilogram grondstof komt bij het fusieproces namelijk ruim tien miljoen keer meer energie vrij dan bij verbranding van fossiele brandstoffen. De technologie voor het produceren en onderhouden van fusiereacties is uiterst complex. Daarom zullen fusiereactoren niet vóór 2030 op commerciële wijze energie produceren. Het opwindende onderzoek met als doel de ontwikkeling van een nieuwe, schone energiebron vindt echter nu plaats.





# NATUUR '90 & TECHNIEK

februari / 58<sup>e</sup> jaargang / 1990



## ZWEMMEN OF ZINKEN

130

Voortbeweging onder water

**J.J. Videler**

Onze planeet heeft een verkeerde naam. In plaats van Aarde zou ze Water moeten heten. Het overgrote deel van haar oppervlak is immers met die vloeistof bedekt. Het leven begon in het water en zelfs nu, na enkele miljarden jaren evolutie, is een enorm aantal soorten uitsluitend of voornamelijk daar te vinden. Die organismen moeten goed zijn aangepast aan de fysische omstandigheden van het medium water: zo moeten ze uitstekend kunnen drijven en zwemmen. Welke eigenschappen van water spelen een rol voor organismen die zich voortbewegen onder water?



## FOSSIELEN VAN HET UUR NUL

142

De vroege fasen van het heelal

**H. Reeves en Th. van der Hulst**

Het heelal is er niet altijd geweest, maar is zo'n 15 miljard jaar geleden in een gigantische explosie, de oerknal, ontstaan. Sindsdien wordt het heelal al maar groter en kouder. In de loop der tijd ontstonden de elementaire deeltjes en atomen, waaruit zich alle materie in de ruimte vormde. Om de dramatische gevolgen van de oerknal goed te kunnen begrijpen is het onontbeerlijk weet te hebben van het heelal vlak na de grote klap. Welke effecten van de oerknal kunnen we nu nog constateren, met andere woorden, welke fossielen bestaan er die ons kunnen helpen meer over het vroege heelal te weten te komen?



## WEGWIJS IN MARMER

154

**L.J.M.G. Moens en P.A.M.F. De Paepe**

Weinig natuursteensoorten ogen zo aantrekkelijk als wit marmer. In de kunst en het economisch bestel van Hellas en Rome speelde wit marmer al een belangrijke rol en het heeft nog niets aan waarde ingeboet. Door diverse natuurwetenschappelijke technieken en statistische methoden te gebruiken, slaagde een onderzoeksteam er onlangs in om een groot aantal eigenschappen van wit marmer te bepalen en op die manier een 'vingerafdruk' te nemen van antieke marmersoorten. Dit gegevensbestand laat toe om de plaats van herkomst van het marmer te bepalen, dat in kunstwerken uit eender welk tijdperk zit verwerkt.

## ANALYSE EN KATALYSE

168

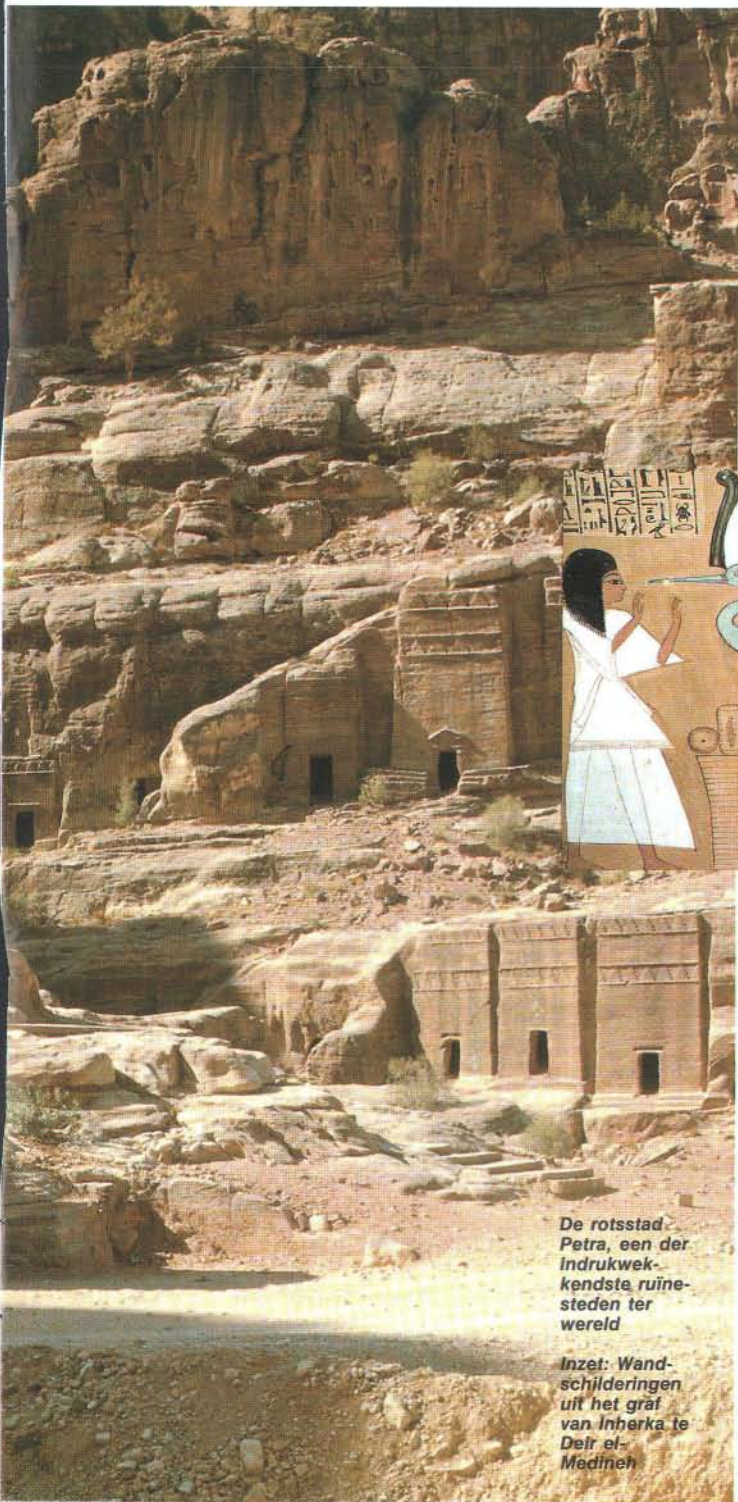
Bedilzucht en dwangmatige bureaucratie

## PRIJSVRAAG

176







De rotsstad  
Petra, een der  
Indrukwek-  
kendste ruïne-  
steden ter  
wereld

Inzet: Wand-  
schilderingen  
uit het graf  
van Inherka te  
Deir el-  
Medineh

## Reissom

In de reissommen zijn begrepen: heenvlucht Amsterdam-Cairo (alle reizen); terugvlucht Cairo-Amsterdam (reis A); terugvlucht Amman-Amsterdam (reizen B en D); terugvlucht Tel Aviv-Amsterdam (reizen C en E) – alle intercontinentale reizen per KLM; alle binnenlandse vluchten in Egypte (reizen A, B en C); luchthavenrechten; haven- en bruggelden; bagage-afhandeling op de luchthavens en in de hotels; alle transfers (per luxe touringcar); accommodatie in alle hotels; alle fooien; begeleiding door gidsen en door de speciale reisbegeleiders;

alle toegangsbewijzen voor musea, monumenten e.d. in het programma vermeld.

*Niet* inbegrepen in de reissom zijn: visumkosten; verzekeringen (reis- en ongevallen); vaccinaties; uitgaven van persoonlijke aard, drankjes en de daarbij behorende fooien e.d.

## Accommodatie

Huisvesting in hotels van de luxe klasse, in Assioet en in de Sinaï in de beste hotels ter plaatse. De kamers zijn waar mogelijk voorzien van alle faciliteiten.

## Israël

Wanneer, na overleg met de Nederlandse ambassades in het Midden Oosten, mocht blijken dat reizen door Israël als gevolg van te grote politieke spanningen een werkelijk risico betekent, dan zal het reisdeel in Israël komen te



vervallen. Reis C zal dan worden uitgevoerd als reis B en reis E als reis D.

Wij geven u hieronder een overzicht van het reisprogramma. Achter de datum staat met een letter aangegeven op welke reis of op welke combinatie de beschrijving van toepassing is:

- |   |   |
|---|---|
| A | 13 dagen Egypte;                            |
| B | 20 dagen Egypte, Sinaï en Jordanië;         |
| C | 22 dagen Egypte, Sinaï, Jordanië en Israël; |
| D | 10 dagen Sinaï en Jordanië;                 |
| E | 12 dagen Sinaï, Jordanië en Israël.         |

Wijzigingen in het programma voorbehouden.

#### **Zondag 14 oktober (A B C)**

##### **Amsterdam-Cairo.**

In de ochtend vertrek met de KLM vanuit Amsterdam. Aankomst in het begin van de avond in Cairo, met meer dan 10 miljoen inwoners de grootste stad van Afrika. Ons hotel ligt in Giza, op wandelafstand van de grote pyramiden.

#### **Maandag 15 oktober (A B C)**

##### **Cairo.**

In het Egyptisch museum wordt aan de hand van beelden, reliëfs en voorwerpen uit de periode van 3000-1200 v. Chr. de basis gelegd voor onze latere excursies naar tempels en graven uit het oude Egypte. Na de lunch een bezoek aan Koptisch Cairo. Hier kan men het Koptisch Museum, een Koptische kerk en een synagoge bezichtigen. Reizigers die al eerder Koptisch Cairo bezochten kunnen in plaats van deze excursie na de lunch hun bezoek aan het Egyptisch Museum voortzetten. 's Avonds houdt uw reisgeleider een korte inleiding over het Oude Rijk, als voorbereiding op de excursie van morgen.

#### **Dinsdag 16 oktober (A B C)**

##### **Saqqara, Memphis en Giza.**

Op 30 km ten zuiden van Cairo ligt aan de rand van de woestijn een dodenstad die meer dan 2000 jaar gebruikt is. We bezichtigen hier het verstilte grafcomplex met de trappijpyramide van koning Djoser uit de 3e dynastie (2600 v.

Chr.), en de fraai gedecoreerde *mastaba's* van hoogwaardigheidsbekleders uit de 5e en 6e dynastie. Na een kort bezoek aan de resten van Memphis, eens de machtige hoofdstad van het Oude Rijk, lunchen we in Giza waar we vervolgens een bezoek brengen aan de grote pyramide van Cheops (2500 v. Chr.), aan de daltempel en aan het museum waar de in 1954 gevonden Koninklijke Boot tentoongesteld wordt. Zij die al eerder Egypte bezochten kunnen een aantrekkelijk alternatief programma volgen naar de minder bekende pyramiden van Dasjoer en Meidoem en (archeologische) bezienswaardigheden in de Fajjoem oase.

#### **Woensdag 17 oktober (A B C)**

##### **Naar de Charga oase.**

In de morgen vliegen we naar Charga, een 'onbekend' stukje Egypte in de Lybische woestijn, 500 km ten zuiden van Cairo en 200 km westelijk van de Nijl. Na de lunch een bezoek aan de Hibis-tempel, tijdens de eerste Perzische overheersing omstreeks 500

v. Chr. door Darius gesticht. Daarna een bezoek aan de vroeg-Christelijke dodenstad el-Baghawat.

#### **Donderdag 18 oktober (A B C)**

##### **Charga en naar Minia.**

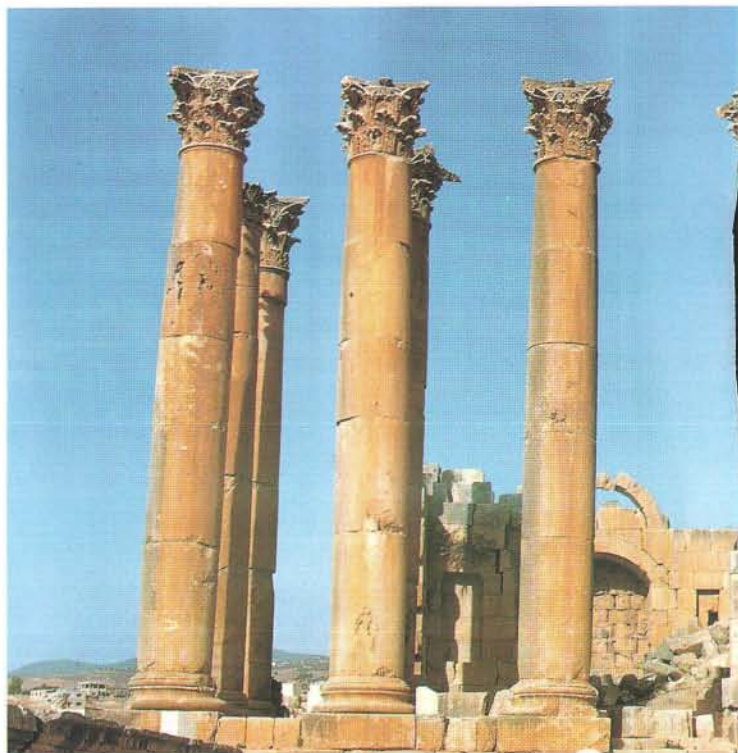
In de ochtend een rondwandeling door oud-Charga en een bezoek aan een van de tot karavaan-fort omgebouwde tempels die men in deze oase aantreft. Na de lunch per luxe touringcar langs de schitterende woestijnweg naar Minia.

#### **Vrijdag 19 oktober (A B C)**

##### **Beni Hasan en El-Amarna.**

We vertrekken vroeg naar ons eerste reisdoel: Beni Hasan. Hier bevinden zich de rotsgraven van de gouvversten uit het Middenrijk (2100-1800 v. Chr.). De wanden zijn bedekt met stuc en beschilderd met jachtmotieven, worstelcènes en plechtigheden uit het leven van de grafeigenaar. Omdat er vandaag op onze route geen geschikte eetgelegenheden zijn hebben we lunchpakketten meegenomen.

Vroeg in de middag een bezoek





aan Tell el-Amarna waar slechts ruïnes zijn overgebleven van Achet-Aton, eens de 'lichtstad' van ketterkoning Achnaton; deze stad werd aan het einde van een van de meest schokkende periodes uit de Egyptische geschiedenis grondig verwoest.

Aan het eind van de middag bereiken we Assioet, waar we overnachten.

## **Zaterdag 20 oktober (A B C)**

### **Abydos en Dendera.**

We bezoeken vandaag twee tempels met een sterk verschillend karakter. In de ochtend doen we Abydos aan. Het is geen wonder dat in dit vruchtbare gebied waar thans vooral suikerriet verbouwd wordt het centrum lag van de cultus van de god Osiris, de god van het opgroeiende gewas. Abydos



*Linksonder: Artemis-tempel in Gerasa, het tegenwoordige Djerash*

*Links: Handwerkslieden in Egypte*

was het Mekka van de oude Egyptenaren die hier veelal een schijngraf hadden. Koning Seti I (1318-1304 v. Chr.) heeft hier een dodentempel laten bouwen waar het gehele pantheon van Egyptische goden in schitterende hoogreliefs is weergegeven. Na de lunch gaan we naar de goedbewaarde Hathor-tempel in Dendera. De laatste Ptolemaeën, onder wie Cleopatra VII, zijn tussen 100-50 v. Chr. begonnen met de bouw die door Romeinse keizers voltooid is. In de avond bereiken we Luxor waar ooit de hoofdstad Thebe van het Nieuwe Rijk lag.

## **Zondag 21 oktober (A B C)**

### **West Thebe en Karnak.**

We steken al vroeg de Nijl over naar de dodenstad van het Nieuwe Rijk (1567-1085 v. Chr.). In de Vallei der Koningen bezoeken we enkele koningsgraven die diep in de rots zijn uitgehakt. Daarna

staan de terras-tempel van koningin Hatsjepsot en enkele graven van Edelen op het programma. Na de lunch een bezoek aan het reusachtige tempelcomplex van Karnak.

## **Maandag 22 oktober (A B C)**

### **West Thebe en Luxor.**

Opnieuw een vroege overtocht over de Nijl. Ditmaal langs de Memnonkolossen, naar twee dodentempels, het Ramsesmuseum van Ramses II en Medinet Haboe van Ramses III. Daarna naar de Vallei der Koninginnen waar we de gedecoreerde rotsgraven van enkele prinsessen bezoeken. We besluiten onze excursie op de westoever met Deir el-Medineh, het geïsoleerde dorpje waar de ambachtslieden van de dodenstad woonden. In de rotsen hebben deze werklieden hun eigen graf aangelegd. Na de lunch bekijken we de tempel van Luxor, en voor het diner volgt nog een bezoek aan het kleine maar buitengewoon mooie museum van Luxor.

## **Dinsdag 23 oktober (A B C)**

### **Esna, Edfoe, Kom Ombo en naar Aswan.**

Vandaag brengt de luxe touringcar ons naar Aswan. Onderweg stoppen we eerst in Esna, om zijn tempel maar ook voor het stadje. Daarna een uitgebreid bezoek aan de Horus-tempel van Edfoe. Doordat de tempel uit de tijd van de Ptolemaeën nog intact is, krijgt men nergens een zo duidelijk beeld van een Egyptisch heiligdom als hier. Bij de tempel is een rest-house waar u het lunchpakket kunt aanspreken. De laatste stop voor we Aswan bereiken is de dubbeltempel van Kom Ombo die door een iets verhoogde ligging over de Nijl uitziet. Aan het eind van de middag komen we aan in Aswan, de zuidelijkste grote stad van Egypte.

## **Woensdag 24 oktober (A B C)**

### **Philae en Aswan.**

Vanmorgen bezoeken we de tempel van Philae. Bij een reddingsoperatie tussen 1972 en 1980 is de tempel die bedreigd werd door het fluctuerende water geheel ontmanteld en opnieuw opgebouwd op een hoger gelegen eiland. Na een bezoek aan het kleine museum op het eiland Elefantine en de lunch in ons hotel kun-





tine en de lunch in ons hotel kunnen we uitrusten tijdens een zeiltocht door de cataract met *felloeka's*, de typische Nijlzeilboten. In de botanische tuin op Kitchener eiland drinken we dan thee.

#### **Donderdag 25 oktober (A B C)**

##### **Aboe Simbel (aanvullende excursie) of Aswan; naar Cairo.**

De reizigers die voor de excursie naar Aboe Simbel geboekt hebben worden naar de 300 km zuidelijker gelegen tempels gevlogen. Zij kunnen hier de resultaten zien van twee unieke ondernemingen: het uithakken en decoreren van de gigantische rotstempels, onder Ramses II (in 1250 v. Chr.), en de reddingsoperatie door Unesco waarbij het gehele tempelcomplex en het omringende landschap is ontmanteld en 60 meter hoger opnieuw is opgebouwd.

Voor degenen die in Aswan zijn gebleven is er een excursie naar het Koptische Simeonsklooster. In de middag vliegen we terug naar Cairo. Diner en overnachting in ons hotel in Giza.

#### **Vrijdag 26 oktober (A)**

##### **Cairo-Amsterdam.**

Voor de deelnemers aan reis A is dit de dag van de terugreis. In de loop van de ochtend wordt u naar de luchthaven gebracht en vliegt u terug per KLM. Aankomst in Amsterdam aan het eind van de middag.

#### **Woensdag 24 oktober (D E)**

##### **Amsterdam-Cairo.**

Deelnemers voor de reizen D en E vertrekken laat in de ochtend met de KLM vanuit Amsterdam. Aankomst in het begin van de avond in Cairo. Ons hotel ligt in Giza, op wandelafstand van de grote pyramiden.

#### **Donderdag 25 oktober (D E)**

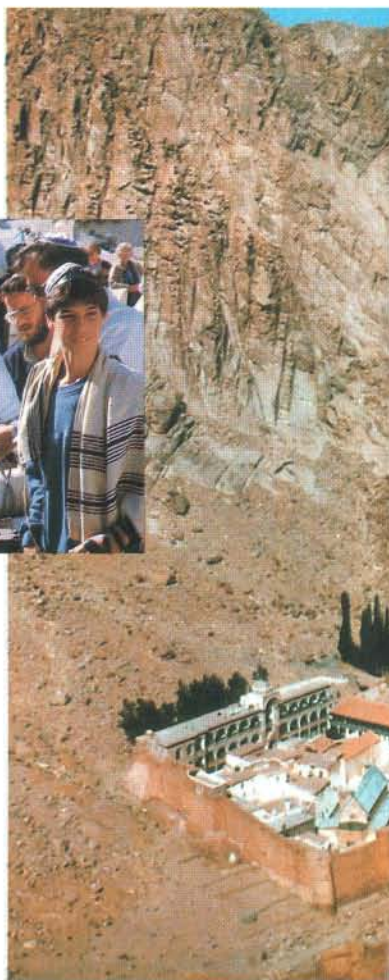
##### **Saqqara, Memphis en Giza.**

Ook voor de deelnemers aan de reizen D en E is er een beperkt Egypte-programma. 's Morgens een bezoek aan Saqqara, 30 km ten zuiden van Cairo, waar we de trappijpyramide van Djoser en graven uit het Oude Rijk bezoeken. Na een bezoek aan de resten van het nabijgelegen Memphis lunchen we in Giza. In de middag bezichtigen we het museum van de 4500 jaar oude Koninklijke Boot van Cheops en het pyramidecomplex van Giza.

*Onder: Religie speelt in het huidige Jeruzalem een belangrijke rol*



*Rechts: Het 14 eeuwen oude klooster Sta Catharina aan de voet van de Mozesberg*



#### **Vrijdag 26 oktober (B C D E)**

##### **Van Cairo naar de Sinaï.**

Vertrek per touringcar via Suez naar de Sinaï. Langs de Mozesbronnen en andere oasen naar het Byzantijnse Catharinaklooster midden in het Sinaïgebergte. Diner en overnachting in het nabijgelegen hotel. Doorzetters kunnen na een klim van nog eens 700 meter op de top van de Mozesberg een onvergetelijke zonsopgang meemaken.

#### **Zaterdag 27 oktober (B C D E)**

##### **Catharinaklooster en Akaba.**

In de ochtend bezoek aan het Catharinaklooster. Onder keizer Justinianus werd als onderkomen voor de monniken die zich hadden gevestigd in de buurt van het 'brandende braambos' een fort gebouwd om bescherming te bieden tegen de aanvallen van plunderende bedoeïnen. Door zijn geïsoleerde ligging is het klooster goed bewaard gebleven. Het is beroemd om zijn ikonen, handschriften en mozaïeken vanaf de zesde eeuw. Na de lunch vertrek voor een tocht door de Sinaï en langs de golf van Akaba naar Bir Taba, dicht bij Eilat. Een boot brengt ons dan in korte tijd naar Akaba.

#### **Zondag 28 oktober (B C D E)**

##### **Naar Petra.**

Van Akaba rijden we via de Desert Highway met prachtige uit-

zichten naar Petra. Na de lunch bezoek aan deze uitgestorven rotsstad uit de Hellenistische en Romeinse periode.

#### **Maandag 29 oktober (B C D E)**

##### **Petra en naar Amman.**

Tweede bezoek aan Petra. Na de lunch vertek voor een tocht via de kruisridderburcht Sjobek naar Madaba. Hier bezoeken we de beroemde Byzantijnse mozaïeklandkaart van Palestina. Diner en overnachting in Amman.

#### **Dinsdag 30 oktober (B C D E)**

##### **Naar Djerassj.**

In de ochtend bezoek aan Djerassj, een van de best bewaard gebleven Romeinse steden. De hoogtepunten van Gerasa zijn het





forum, de *cardo maximus* (de met zuilen geflankeerde hoofdstraat), de Artemis-tempel en het theater. Terug in Amman bezoek aan het Archeologisch Museum.

#### **Woensdag 31 oktober (B D)**

##### **Amman.**

In de ochtend bekijken we het oude Amman met o.a. het Romeinse theater. Wij blijven in Amman als de deelnemers aan de reizen C en E vertrekken. Na de lunch museumbezoek.

#### **Donderdag 1 november (B D)**

##### **Excursie woestijnkastelen.**

De laatste excursie in Jordanië van deelnemers aan de reizen B en D voert ons door de woestijn ten oosten van Amman langs en-

kele vroeg-arabische woestijnkastelen waarvan Kasr Amra wel de mooiste is. Deze paleizen werden door de kaliefen van Damascus gebouwd voor jacht en andere ontspanning en zijn vaak gegrondvest op de fundamenteën van Romeinse grensforten.

#### **Vrijdag 2 november (B D)**

##### **Amman-Amsterdam.**

Vroeg in de ochtend terugvlucht per KLM. Omstreeks het middaguur aankomst in Amsterdam.

#### **Woensdag 31 oktober (C E)**

##### **Amman en naar Kapernaüm.**

In de ochtend bekijken we het oude Amman met o.a. het Romeinse theater. Daarna verlaten we Jordanië via de Allenby-brug over de Jordaan. Ons volgende reisdoel is nu het vroeg-islamitische paleis Kirbet el-Mafdjir met fraaie mozaïeken. Daarna gaat de tocht naar het meer van Tiberias. Overnachting in de omgeving van Kapernaüm.

#### **Donderdag 1 november (C E)**

##### **Galilea en naar Jeruzalem.**

Eerst bezichtigen we de indrukwekkende ruïne van een synagoge uit de Romeinse tijd te Kapernaüm. Daarna een bezoek aan de plaats van de Bergrede en aan de plaats van de Wonderbare Spijziging. Via Nazareth met o.a. de kerk van de Aankondiging aan Maria rijden we naar Jeruzalem.

#### **Vrijdag 2 november (C E)**

##### **Jeruzalem en Bethlehem.**

De Olijfberg biedt een schitterend uitzicht over oud-Jeruzalem. Via de Hof van Gethsemane naar de Stefanuspoort. Hier begint onze wandeling over de Via Dolorosa naar de Grafkerk, die ook het gebied van Golgotha omvat. Lunch in het Citadel Museum bij de Jaffa-poort. In de middag naar Bethlehem voor de bezichtiging van de Geboortekerk, een imposante basiliek gesticht door Constantijn de Grote. Overnachting in Jeruzalem.

#### **Zaterdag 3 november (C E)**

##### **Dode Zee en Massada.**

Langs de Dode Zee naar Massada, het laatste bolwerk van de Joden in hun strijd tegen de Romeinen. Per kabelbaan komen we bij de indrukwekkend gelegen burcht

boven op de rots. Lunch in Ein Gedi aan de Dode Zee, bekend om zijn zwavelbronnen. Via Qumran terug naar Jeruzalem.

#### **Zondag 4 november (C E)**

##### **Jeruzalem en terugreis.**

Een hoogtepunt van onze reis door Israël is ongetwijfeld het bezoek aan de Klaagmuur en het tempelplein met de El-Aksa moskee en de gouden Rotskoepel. Hierna naar Yad Vashem, museum ter herdenking van de Holocaust, of naar het Israël Museum met de boekrollen uit Qumran. Na de lunch vertrek naar het vliegveld Lod. Terugvlucht per KLM. In de avond aankomst in Amsterdam.

##### **Kennismakingsbijeenkomst**

Enige tijd vóór de reis is er een kennismakingsbijeenkomst. Dan kunt u uw medereizigers ontmoeten en degenen die uw reis begeleiden. Medewerkers van het reisbureau zijn aanwezig om uw vragen te beantwoorden en als voorbereiding op de reis zal er een inleiding gehouden worden door uw reisbegeleider(s).

##### **Aanmelding**

Belangstellenden voor een reis kunnen zich rechtstreeks opgeven bij NATUUR & TECHNIEK met behulp van de inschrijfkartaal in dit nummer. Gezien het beperkte aantal deelnemers wordt inschrijving (in volgorde van binnenkomst) pas definitief door overmaking van f 250,- op girorekening 5859447 t.n.v. Holland Travel Service te Hengelo onder vermelding van 'Midden-Oostenreis' en de letter van de reis(combinatie) volgens onderstaand schema:

- A 13 dagen Egypte;
- B 20 dagen Egypte, Sinaï en Jordanië;
- C 22 dagen Egypte, Sinaï, Jordanië en Israël;
- D 10 dagen Sinaï en Jordanië;
- E 12 dagen Sinaï, Jordanië en Israël.

De inschrijftermijn sluit zodra het maximale aantal deelnemers is bereikt, uiterlijk op 15 april 1990.

**Natuur & Techniek  
Stichting Avicula**

# SIMULATICA

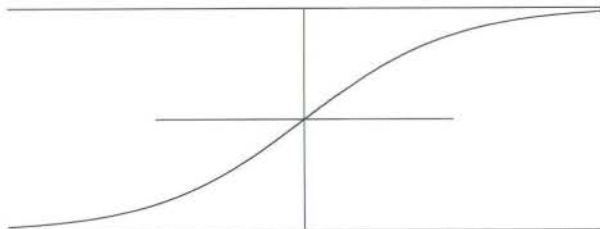
Prof dr  
Hans Lauwerier

## Griepgolven

Een griep epidemie teisterde omstreeks de jaarwisseling Engeland en bedreigde ook Nederland en België. Het verloop van een epidemie volgt in het algemeen een min of meer vast patroon. Aanvankelijk zijn slechts enkele mensen ziek, maar het aantal ziektegevallen stijgt exponentieel, volgens de wet van ongeremde groei. In constante perioden verdubbelt zich telkens het totale aantal zieken. Na verloop van tijd treedt een soort remming op. Het duurt steeds langer voordat het totale aantal zieken verdubbeld is en tenslotte komen er geen nieuwe ziektegevallen meer bij. Om een epidemie te voorkomen kunnen de mensen zich op grote schaal laten inenten, of door thuis te blijven eventuele gevaarlijke contacten vermijden. Ook kan men de besmettelijk zieken isoleren van de bevolking. Maar hoever kan en moet men gaan? Een geland vliegtuig kan altijd besmette passagiers herbergen, die ons infecteren. Maakt het uit of dat er veel of weinig zijn?

Al meer dan zestig jaar maken deskundigen gebruik van wiskundige modellen om inzicht te krijgen in het mogelijke verloop van een epidemie en om vragen als hierboven gesteld te kunnen beantwoorden. De modellen beschrijven de waargenomen ontwikkeling van een epidemie als die waarbij het totale aantal ziektegevallen in de tijd ongeveer het verloop heeft van de zogenaamde logistische lijn. Dit is een S-vormige kromme bepaald door:  $f(t) = \exp(t)/(1 + \exp(t))$ .

De logistische kromme, een model van geremde groei en van een epidemie



Eén van de interessante uitkomsten van het onderzoek is dat het er niet toe doet met hoeveel ziektegevallen een mogelijke epidemie begint. Een epidemie blijft zich slechts door te zetten wanneer een bepaalde kritieke grens, een drempel, wordt overschreden; een verschijnsel dat bekend staat als de 'drempelwet'. Die drempel hangt uiteraard af van de besmettelijkheid van de ziekte, maar ook van de immuniteitsgraad van de bevolking en van het gemiddelde aantal contacten tussen gezonden en zieken. Een belangrijke gevolgtrekking is, dat het niet noodzakelijk is iedereen in te enten. Zodra men door inenting beneden de drempel komt, hoeft men geen ernstige epidemie meer te duchten. Een eenmaal begonnen ziekteproces, hetzij met weinig hetzij met veel zieken, loopt dan vanzelf dood en een epidemie krijgt niet de kans zich te ontplooiën. Voor elke gevaarlijke ziekte, van malaria tot AIDS, is wel een specifiek model beschikbaar dat de eigenaardigheden van het ziekteproces en de wijze van besmetting zo goed mogelijk imiteert. In deze aflevering van Simulatica behandelen we een eenvoudig model, dat ondanks zijn eenvoud toch een goed inzicht geeft in de algemene gang van zaken. Men kan in een dergelijk model een aantal parameters vrij kiezen en dan aan de hand van een grafiekje de gevolgen overzien. Zo kan men bijvoorbeeld zelf uitzoeken hoe de besmettelijkheid van de ziekte of het aanvankelijke aantal zieken een mogelijk verloop van een epidemie beïnvloeden.

## Epidemie als chemie

Het al in 1927 ontwikkelde epidemische model van Kermack en McKendrick doet denken aan het model van een chemische reactie. Bij een chemische reactie let men niet op de individuele molekulen van de te reageren stoffen maar beschrijft men hun concentraties als conti-



nue variabelen van de tijd, die gedifferentieerd kunnen worden. In het epidemische model denken we aan een populatie waarvan het aantal individuen onveranderlijk is. In de bevolking onderscheiden we vatbaren, besmettelijk zieken en immunen, en net als in de scheikunde duiden we ze aan als tijdafhanke-lijke concentraties, respectievelijk,  $x(t)$ ,  $y(t)$  en  $z(t)$ . De som van de drie grootheden is dan altijd 1. We nemen aan dat het doormaken van de ziekte blijvende immuniteit verschaft.

Het model bestaat uit de twee differentiaalvergelijkingen

$$\begin{aligned} dx/dt &= -axy \\ dy/dt &= axy - by \end{aligned}$$

eventueel aangevuld met

$$x + y + z = 0$$

De eerste vergelijking zegt dat de mate van afname van het aantal vatbaren, ofwel de vorming van nieuwe ziektegevallen, bepaald is door de wisselwerking van vatbaren  $x$  en besmettelijk zieken  $y$ . De evenredigheidsfactor  $a$  drukt de mate van besmettelijkheid uit. De tweede vergelijking zegt dat het aantal zieken in een (kleine) tijdsperiode enerzijds toeneemt doordat vatbaren ziek worden en anderzijds afneemt doordat zieken beter en immuun worden. De factor  $b$  geeft de immuniteitsgraad weer. Men zou kunnen zeggen dat telkens, zeg per week, een vast percentage zieken beter wordt.

Om dit model met behulp van de computer te analyseren herschrijven we de differentiaalquotienten in differentiequotienten op de wijze van

$$dx/dt \sim (x(t+h)-x(t))/h$$

waarbij  $h$  een zeer klein interval van de tijd is. We kunnen de twee vergelijkingen dan schrijven als

$$x(t+h) = x(t) - hax(t)y(t)$$

en

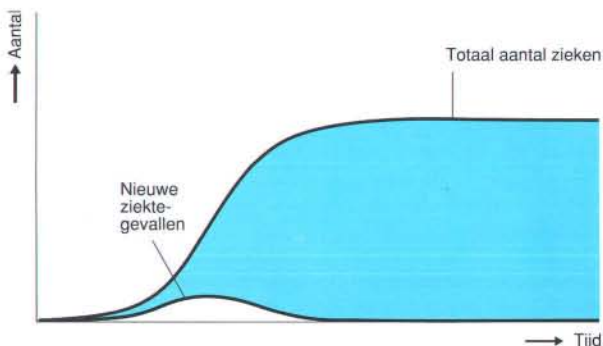
$$y(t+h) = y(t) + h(ax(t) - by(t))y(t)$$

Uitgaande van een gegeven beginsituatie  $t = 0$  kunnen dan  $x(t)$  en  $y(t)$  stap voor stap op elk gewenst tijdstip, na het verstrijken van een veelvoud van periode  $h$  uiteraard, worden berekend. Die berekening geschiedt in het onderstaande programma genaamd EPID1. In dat programma kunnen de parameters  $a$  en  $b$  door de gebruiker zelf worden gekozen. Verondersteld is dat op het begin-

tijdstip geldt:  $x = 1 - \text{eps}$ ,  $y = \text{eps}$ ,  $z = 0$  waarbij  $\text{eps}$  een erg klein getal is dat staat voor de fractie besmettelijke zieken die verantwoordelijk is voor het eventuele ontstaan van een epidemie. Ook dat getal kan vrij worden gekozen.

```

10 REM ***EPIDEMISCH MODEL***
20 REM ***NAAM:EPID1***
30 SCREEN 9 : CLS
40 PRINT "KIES BIJV. A=40, B=20, EPS=.001"
50 PRINT : INPUT "A = ", A
60 INPUT "B = ", B
70 INPUT "EPS = ", EPS
80 CLS : WINDOW (0,0)-(365,1)
90 LINE (0,1)-(0,0) : LINE -(365,0)
100 X=1-EPS : Y=EPS : H=1/365
110 FOR T=0 TO 365
120 U=A*X*Y : X=X-H*U
130 Y=Y+H*(U-B*Y)
140 PSET (T,10*H*U) : PSET (T,1-X)
150 NEXT T
160 END
    
```



Bij het gegeven programma is min of meer willekeurig gekozen voor een periode van een jaar verdeeld in 365 dagen. De lezer kan door met het programma te experimenteren ontdekken, dat de grootte van de verhouding  $a/b$  bepaalt of een ziekteproces zich al dan niet tot een epidemie ontwikkelt. We hebben hier te maken met de genoemde 'drempelwet'. Ligt  $a/b$  onder de drempelwaarde dan ontstaat er geen epidemie, maar als de drempel overschreden wordt komt een epidemie op gang ongeacht het aanvankelijke aantal zieken. De waarde van  $\text{eps}$  beïnvloedt alleen het tijdstip waarop de epidemie zijn hoogtepunt bereikt. Een illustratie van het programma staat op deze bladzijde. Zowel het totale aantal zieken als het dagelijkse aantal nieuwe ziektegevallen is afgebeeld.

**Het programma EPID1 toont een epidemisch proces, waarin de logistische kromme is terug te vinden**

**E.J. Barron** ('Broeikaseneffekt') studeerde klimatologie. Hij is directeur van het Earth System Science Center van de universiteit van Pennsylvania. Daarnaast is hij redacteur van het tijdschrift *Global and Planetary Change*.

**W. Frese** ('Regelgenen') werd op 2 juni 1946 geboren in het Beierse Landau. Hij studeerde van 1966 tot 1974 wis- en sterrenkunde in München en in Göttingen. Hij is als wetenschapsjournalist gespecialiseerd in geneeskunde, biochemie en biologie. Sinds 1977 werkt hij bij de persdienst van de Max-Planck-Gesellschaft.

**Prof dr P. Gruss** ('Regelgenen') is in 1949 in Alsfeld, Hessen geboren. Hij studeerde in Darmstadt en Heidelberg en promoveerde in 1977. Daarna werkte hij tot 1982 als onderzoeker in de VS. Van 1982 tot 1986 was hij hoogleraar microbiologie in Heidelberg. Hij is nu directeur van de afdeling Moleculaire Celbiologie van het MPI te Göttingen.

**Dr A.J.H. Donné** ('Fusie') werd in 1956 in Venlo geboren. Hij studeerde natuurkunde in Utrecht en promoveerde in 1985 aan de Vrije Universiteit te Amsterdam. Sindsdien werkt hij bij het FOM-instituut voor Plasmafysica 'Rijnhuizen' in Nieuwegein. Daar is hij leider van een groep die kernfusie in een tokamak onderzoekt.

**Dr A.A.M. Oomens** ('Fusie') werd op 10 april 1948 geboren in Breda. Hij studeerde natuurkunde in Nijmegen en promoveerde in 1976 te Utrecht. Sinds 1971 is hij werkzaam bij het FOM-instituut 'Rijnhuizen', momenteel als groepsleider machine-operatie en dataverwerking van een tokamakproject.

**Dr J.J. Videler** ('Voortbeweging') is op 1 april 1941 in Heerlen geboren. Hij studeerde biologie aan de Universiteit van Amsterdam. Na zijn afstuderen trad hij in dienst van de Rijksuniversiteit Groningen, waar hij in 1975 promoveerde en thans hoofd is van de afdeling Mariene Zoölogie.

**Dr J.M. van der Hulst** ('Oerknal'), geboren in 1948 in Den Haag, studeerde sterrenkunde in Groningen, waar hij in 1977 promoveerde. Hij was radiosterrenkundige en assistent-hoogleraar in de VS en hoofd van het waarnemingsbureau van de sterrenwacht te Westerbork. Sinds 1988 is hij universitair hoofddocent aan de RU Groningen.

**Prof dr H. Reeves** ('Oerknal') werd in 1952 geboren in Montreal, Canada. Hij is nu onder andere onderzoeksdirecteur van het CNRS te Parijs en adviseur van het Commissariat à l'Energie Atomique in Frankrijk. Naast wetenschappelijk werk heeft hij diverse populair-wetenschappelijke boeken en films gemaakt.

**Dr L.J.M.G. Moens** ('Marmer') is in 1954 in Bornem geboren. Hij studeerde scheikunde in Gent en promoveerde daar in 1981. Hij is verbonden aan het Laboratorium voor Toegepaste Scheikunde van de RU Gent. Daar is hij werkleider analytische chemie ten behoeve van de archeologie. Hij is tevens coördinator van een Europese onderzoeksgroep.

**Dr P.A.M.F. De Paepe** ('Marmer') werd in 1939 in Kortrijk geboren. Hij studeerde aard- en delfstofkunde aan de RU Gent en promoveerde daar in 1968. Hij is lector aan de RU Gent en houdt zich bezig met de herkomstanalyse van keramiek en natuursteen.

#### **Van Marum Penning voor Simon Rozendaal**

Wetenschapsjournalist ir Simon Rozendaal heeft op 5 januari 1990 de Van Marum Penning van de Koninklijke Nederlandse Chemische Vereniging ontvangen. Simon Rozendaal is redacteur van het weekblad Elsevier en medewerker van Natuur en Techniek. De jury die de tweejaarlijkse prijs voor voorlichting over chemie toekende, constateerde over zijn werk "dat het de toetsing aan de grondwetten van de journalistiek, met name wat betreft integriteit en basering op verifieerbaar feitenmateriaal, ruimschoots doorstaat." In het juryrapport werd verder zijn analyse van het verschijnsel 'milieuhysterie' genoemd.



Inmiddels zijn we wel zover, dat in het artikel van A.J.H. Donné en A.A.M. Oomens over kernfusie (pag. 118) de zogenaamde koude kernfusie als een curiositeit kan worden afgedaan. Er is weliswaar niet onomstotelijk bewezen dat de elektrochemici Fleischmann en Pons geen kernfusie hebben waargenomen in hun 'drie-stuivers-experiment', maar nog veel minder dat ze dat wel zouden hebben gedaan. En (vrijwel) niemand gelooft er meer in.

Ze hebben wel voor één van de spannendste episoden in de natuurkunde gezorgd: plasma-fysici, molekuul-fysici en sterrenkundigen – die in elke ster met fusie-reacties te maken hebben – sloegen direkt aan het discussiëren en rekenen.

Een paar slimmerikken haalden meteen nadat de ontdekking via de wetenschappelijke jungle-telegraaf in de laboratoria was doorgedrongen hun spaarcentjes van de bank en kochten zoveel als ze maar krijgen konden van het tot dan toe betrekkelijk waardeloze afvalprodukt palladium: een stof die in de proef van Fleischmann en Pons centraal stond. Ze mochten wellicht het algemene ongehoof delen, ze konden ervan uitgaan dat ook de weerlegging eerder tot de laboratoria zou doordringen dan tot de handelshuizen, en dat zou de gelegenheid geven tijdig te verkopen. Een paar dagen later konden ze een veelvoud van hun geld terugstorten op de bank. Als ze op tijd waren, tenminste.

De eerste reactie uit de wetenschappelijke wereld was: deze proef kan niet. De energie-barrière die overwonnen moet worden om twee kernen tot fusie te brengen is zo groot, dat die niet bij zo'n lage temperatuur kan worden genomen, en is in elk geval vele ordes groter dan het soort bindingsenergie waarvan bij adsorptie sprake is. (Deuterium en lithium zouden zo dicht in het palladium gepakt zitten, dat al bij een lage temperatuur fusie zou kunnen ontstaan.)

Er was evenwel een min of meer vergelijkbaar effect bekend, zelfs al toegepast in de elektronica, het zogenaamde tunneleffect. Elektronen kunnen soms van een hoog energieniveau naar een lager gaan en daarbij een grote 'energiehobbel' nemen, alsof ze door een tunnel onder de energiehobbel door zijn gegaan. Kon hier geen sprake zijn van zo'n tunneleffect? Per slot van rekening is de energie-inhoud van het fusie-produkt kleiner dan van de afzonderlijke molekulen.

Gedurende een paar dagen overstemde het kraken van hoog- en zeergeleerde hersenen het geratel van de printers, maar dat eindigde met een wat meewarige glimlach voor het paar uit Utah, dat al gauw moest toegeven dat een beetje meer zelfkritiek vóór publikatie op zijn plaats zou zijn geweest.

Jammer, want het zou zeker welkom zijn geweest als de weg naar kernfusie aanzienlijk zou zijn bekort. Het artikel van Eric J. Barron (pag. 94) laat geen twijfel bestaan over de urgentie voor het beperken van de produktie van koolzuurgas en dergelijke. De deskundigen zijn het misschien niet eens over de snelheid waarmee de verwarming van de aardatmosfeer zich voordoet; over het bestaan en de ernst van het verschijnsel bestaat geen enkel verschil van mening.

Als we de aarde voor een aantal grote rampen willen behoeden (waarbij te bedenken valt, dat als het broeikaseffect onomstotelijk waargenomen wordt, er absoluut niets meer kan worden gedaan om het te keren), dan zullen we òf naar een lager energiegebruik moeten (en dat lijkt niet echt mogelijk) òf andere dan fossiele brandstoffen moeten gebruiken.



**Eric J. Barron**

Earth System Science Centre  
Pennsylvania State University, University Park, PA





# ONGEWISSE OPWARMING

De voorspellingen over de opwarming van de Aarde – een verschroeide planeet – klinken apocalyptisch. Volgens meteorologen over de hele wereld, zal halverwege de volgende eeuw een dikke deken van vervuilde lucht de hemel hebben bedekt. De isolerende werking van de atmosfeer, die van nature al werkt als een broeikas, zal hierdoor nog worden versterkt. Onderzoekers vermoeden dat de gasen die als gevolg van menselijke activiteit in de lucht terechtkomen, de Aarde enkele graden zullen opwarmen. Dat zal leiden tot een klimaatverandering die even ingrijpend is als die tijdens de laatste ijstijd. Alleen zal de Aarde deze keer niet op een ijskast maar meer op een droogstoof lijken.

## ONVOORSPELBARE GEVOLGEN VAN HET BROEIKASEFFECT

Dat de Aarde opwarmt door de zich in de atmosfeer ophopende broeikasgasen blijkt ondermeer uit de lengte van gletsjers. Sinds 1855 reiken de gletsjers in de Alpen steeds minder diep hun dalen in, wat aangeeft dat er minder sneeuw valt en er meer ijs smelt. In hoeverre het klimaat verandert ten gevolge van de opwarming is voor klimatologen echter nog niet duidelijk.



Om aan te geven hoe de toekomst eruit zal zien, verwijzen veel onderzoekers naar de zomer van 1988 in Noord-Amerika: drie maanden van brandende droogte en recordtemperaturen. In de Great Plains verdroogden de gewassen en vielen meren droog, terwijl de drinkwatervoorraden in de steden tot een zorgwekkend laag niveau slonken. Onderzoekers aan het instituut voor klimaatonderzoek in het Britse Norwich wezen erop, dat 1988 niet het eerste jaar van dit decennium was waarin ongekend hoge temperaturen voorkwamen: ook 1980, 1981, 1983, 1986 en 1987 behoren tot de warmste jaren van de eeuw.

Anderen waren op grond van wetenschappelijk onderzoek een heel andere mening toegedaan en betoogden dat, hoewel de jaren tachtig inderdaad ongekend warm waren geweest, het meteorologische heden en verleden niet onomstotelijk bewijzen dat de hogere temperaturen te wijten zijn aan een versterking van het broeikas effect door de mens. Volgens hen valt het schijnbaar abnormale weer van de laatste tien jaar binnen het bereik van eerdere klimaatsschommelingen – zoals de hittegolf in de jaren dertig of de betrekkelijk koele zomers in de jaren veertig. Het meest betreurenswaardige van dit gekissebis was, dat het punt waar de meeste klimatologen het over eens zijn, erdoor op de achtergrond raakte: de opwarming van de Aarde door de toenemende invloed van de mens op de atmosfeer is absoluut een feit. Men is het er alleen niet over eens wanneer, hoeveel en waar het klimaat zal veranderen en wat het effect daarvan zal zijn op het leven op Aarde.

Er is maar één groot probleem bij het voorspellen van het weer in de toekomst en dat is de complexiteit van het klimaat. Zelfs in de meest doorwrochte computermodellen kan men onmogelijk rekening houden met alle elementen – oceanen, landmassa's, vegetatie, vervuilende stoffen – die het weer op een bepaald tijdstip en op een bepaalde plaats op Aarde bepalen. Bovendien is het moeilijk om alleen op grond van modellen onderscheid te maken tussen tendenzen in het wereldklimaat die het gevolg zijn van menselijke activiteit, en de grootschalige natuurlijke cycli, waarover weinig bekend is. Met de wiskundige vergelijkingen waarop de computermodellen gebaseerd zijn, valt onmogelijk met zekerheid te voorspellen hoe de opwarming van de Aarde,



1

1 en 2. Svante Arrhenius ontdekte dat koolstofdioxide en water de door de Aarde uitgestraalde warmte vasthouden en zo de temperatuur op onze planeet kunnen handhaven. Op basis van dit principe fotografeert de weersatelliet Meteosat dagelijks de watermantel rond de Aarde (2). De satelliet registreert de warmtestraling afkomstig uit de middelste en bovenste lagen van de troposfeer waar waterdampmolekulen de meeste warmte absorberen. De donkere gebieden op de foto duiden op een relatief sterke warmtestraling en dus op een lage vochtigheidsgraad. Omgekeerd corresponderen de lichte gebieden met vochtige luchtlagen.



2



wanneer die eenmaal begonnen is, alle andere aspecten van het klimaat zal beïnvloeden. En evenmin is dat mogelijk op grond van de beschikbare meteorologische gegevens. Wordt een deel van de extra warmte misschien geabsorbeerd door de oceanen? Leiden hogere temperaturen tot een dichter wolkendeek dat de planeet zou kunnen afkoelen? Totdat we dergelijke vragen kunnen beantwoorden moeten we aanvaarden dat we niet zeker weten hoe het klimaat er in de toekomst uit zal zien.

### Broei door atmosferische molekulen

De motor van het weer op Aarde is de Zon. Afhankelijk van veranderingen in de schuine stand van de as van de Aarde en haar positie tijdens de verschillende seizoenen, raken de stralen van de Zon de verschillende delen van de Aarde onder verschillende hoeken. Tropische streken krijgen in het algemeen het zonlicht meer van boven dan de beide polen, die

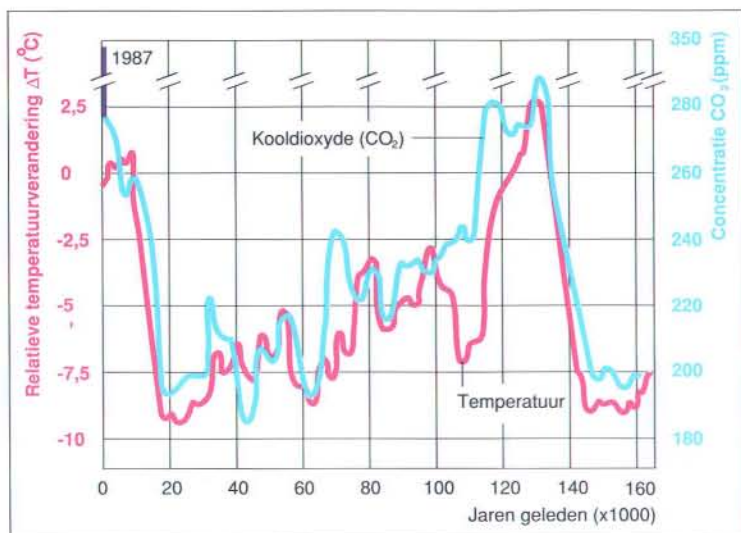
zo scheef worden beschenen dat zich daar massieve ijskappen hebben gevormd. Tijdens de dagelijkse omwenteling van de Aarde, warmt de Zon de lucht en het water op, waardoor wind en oceaanstromingen ontstaan. Ook verdampert er voortdurend water waaruit zich wolken vormen die het land beschermen tegen al te felle zonnestraling.

Door de hoge temperatuur aan het oppervlak van de Zon (ongeveer 4000°C) wordt daar kortgolvlige energie opgewekt, voor het merendeel in de vorm van zichtbaar licht en ultraviolette straling. Beide soorten straling dringen gemakkelijk door de gasvormige laag die de atmosfeer van de Aarde vormt. Wanneer deze kortgolvlige straling het aardoppervlak bereikt, wordt de energie geabsorbeerd door stenen, bodem en water. Bij afkoeling daarvan komt deze energie weer vrij in de vorm van infrarode straling ofwel warmtestraling. De gasen in de atmosfeer kunnen de energie van deze straling, waarvan de golflengte veel groter is dan van het zichtbare licht, echter goed absorberen. De gasen zenden vervolgens de geabsorbeerde energie in alle richtingen uit — voor een groot deel terug naar het aardoppervlak. De atmosfeer houdt dus, net als een broeikas, de temperatuur op Aarde min of meer constant door te voorkomen dat er te veel warmte ontsnapt naar de ruimte.

In de 19de eeuw ontwikkelden onderzoekers de opvatting dat de opvallende eigenschap van de Aarde om zonnewarmte vast te houden wordt bepaald door de samenstelling van haar atmosfeer. De atmosfeer bestaat echter voor driekwart uit stikstof en voor een vijfde uit zuurstof en geen van beide absorberen erg veel warmte. Later, omstreeks de eeuwwisseling, onderzocht de Zweedse chemicus en Nobelprijswinnaar Svante Arrhenius zowel de warmte-absorptie van de Aarde als de energieproductie van de Zon en hij ontdekte dat kleine hoeveelheden van twee andere gasen, koolstofdioxide en waterdamp, voldoende warmte konden vasthouden om de temperatuur van de Aarde op peil te houden.

Hij begreep dat het geheim van de atmosferische deken school in zijn moleculaire samenstelling. Atomen van verschillende gasen trillen en wervelen op een verschillend energieniveau wanneer zij worden gebombardeerd door de warmtestraling die het aardoppervlak uitzendt. Zo is de hoeveelheid koolstofdioxide





3, 4 en 5. Op basis van metingen aan luchtbellen (5) in ijsmonsters afkomstig van het Russische station Vostok in Antarctica (4) zijn zowel het verloop van temperatuur (rood) als koolstofdioxidegehalte (blauw) van de atmosfeer gereconstrueerd (3). Hogere CO<sub>2</sub>-gehalten gaan gepaard met hogere temperaturen. De laatste jaren neemt de hoeveelheid CO<sub>2</sub> zeer sterk toe (blijkens metingen op Hawaï (paars)).

verantwoordelijk voor het verschil tussen de gloeiende temperatuur op Venus, die door een dikke laag van dit gas wordt omringd, en het bevroren oppervlak van Mars, waar vrijwel geen koolstofdioxide voorkomt. Een handvol andere gasen – methaan, CFK's (chloorfluorkoolwaterstoffen), en stikstofoxiden – houden eveneens veel warmte vast en dragen dus bij aan het broeikas effect, hoewel ze, net als koolstofdioxide, in minuscule hoeveelheden in de atmosfeer voorkomen.

### Koolstofdioxide

Arrhenius was een van de eersten die inzag dat er als gevolg van menselijke activiteit aanzienlijke hoeveelheden koolstofdioxide de atmosfeer werden ingeblazen. De eerste belangrijke bron van koolstofdioxide was de steenkooloven, die de aanzet voor de industriële revolutie vormde. Tegenwoordig stoten op olie en benzine draaiende fabrieken, locomotieven, vrachtwagens, auto's en elektriciteitscentrales samen meer dan vijf miljard ton koolstofdioxide per jaar uit. De inwoners van de geïndustrialiseerde wereld zijn verantwoordelijk voor meer dan de helft van de menselijke productie aan koolstofdioxide; minder ontwikkelde landen zoals China zijn eveneens begonnen grote hoeveelheden koolstofdioxide te produceren. En behalve de uitstoot, afkomstig

uit de steden, komt er nog ongeveer een miljard ton koolstofdioxide vrij in de atmosfeer door het afbranden van tropisch regenwoud dat met een snelheid van ongeveer 100.000 vierkante kilometer per jaar wordt vernietigd: hout is net als kolen en gas een rijke koolstofdioxidebron.

De wetenschappelijke wereld hield zich niet bezig met het koolstofdioxide-probleem totdat zij geconfronteerd werd met nauwkeurige metingen van de concentratie van dit gas in de atmosfeer. In 1958 richtte de chemicus Charles D. Keeling een meetstation in op de helling van de Mauna Loa, een vulkaan op het ongerepte eiland Hawaï in de Stille Oceaan. Hier konden de gegevens niet worden beïnvloed door lokale luchtverontreiniging. In de dertig jaar waarin hij meetgegevens verzamelde, steeg de concentratie van koolstofdioxide in de atmosfeer van 315 tot 348 ppm (parts per million).

Klimatologen hebben Keelings gegevens gebruikt voor extrapolaties naar het verleden en schatten op grond daarvan dat de concentratie van koolstofdioxide in het pre-industriële tijdperk slechts 280 ppm bedroeg. Dat cijfer is bevestigd door onderzoek van ijsmonsters, afkomstig uit gletsjers op Groenland en Antarctica, waar oude luchtbellen, bevroren onder sneeuwlagen van duizenden jaren oud, exact dezelfde concentratie bleken te bevatten. De



cijfers laten zien dat de concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer alleen al in de laatste honderd jaar met 25% is gestegen. Afgaand op de hele reeks metingen en ervan uitgaand dat de industrie over de hele wereld even snel zal blijven groeien, voorspellen de meeste chemici die zich bezighouden met de atmosfeer, dat de hoeveelheid koolstofdioxide halverwege de volgende eeuw ongeveer verdubbeld zal zijn en 600 ppm zal bedragen.

### Methaan en CFK's

Koolstofdioxide is niet de enige vorm van luchtvervuiling die de temperatuurhuishouding van de Aarde dreigt te veranderen. Even onheilspellend is de onlangs ontdekte ophoping van methaan, een gas dat per molecuul twintig keer zoveel warmte absorbeert als koolstofdioxide. Methaan komt van nature vrij in moerassen en venen tijdens de afbraak van organisch materiaal door bacteriën. Ook bacteriën in de maag van herkauwers zoals runderen en schapen, produceren methaan – tot ongeveer 200 gram per dag per dier – tijdens de vertering van cellulose.

De laatste tijd steekt de mens de natuurlijke produktie echter naar de kroon, zoals is ont-

dekt na metingen van methaanconcentraties, waar men in de tweede helft van de jaren zeventig mee begon. Uit dit onderzoek blijkt dat de atmosferische concentratie van dit gas ieder jaar met één procent toeneemt.

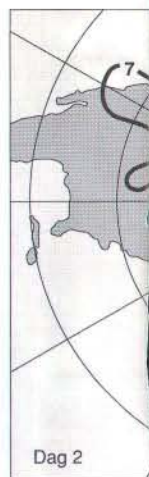
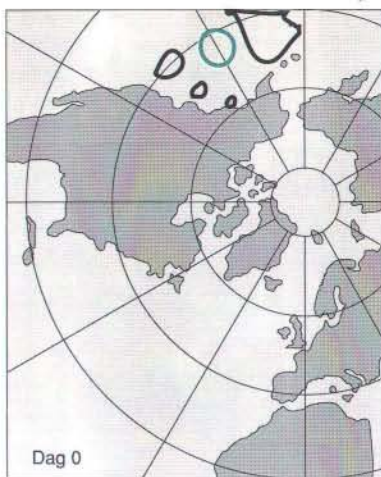
Gegevens uit ijsmonsters tonen bovendien aan, dat de methaanconcentratie driehonderd procent hoger is dan twee eeuwen geleden. Een deel van deze toename kan geweten worden aan het in cultuur brengen, vooral in Oost-Azië en India, van meer dan 1 500 000 vierkante kilometer rijstvelden, waarop dikwijls twee oogsten per jaar worden binnengehaald in gebieden waar voorheen slechts een oogst mogelijk was. Behalve uit de drassige sawa's, ontwijkt er methaan naar de atmosfeer uit de groeiende rijstplanten. Dit komt doordat methaan uit de bodem via de wortels van rijstplanten naar hun luchtkanalen diffundeert en daarlangs ontsnapt. Het fokken van grote kudden vee (boeren over de hele wereld houden er nu zo'n 1,5 miljard stuks vee op na) heeft ook bijgedragen aan de methaanvervuiling. Volgens recente schattingen zou de wereldproduktie aan methaan maar liefst 600 miljoen ton per jaar bedragen, genoeg om de concentratie van dat gas in de atmosfeer in de komende 100 jaar te verdubbelen. En men is



5

nog maar pas begonnen met uitzoeken hoeveel methaan er vrij zou komen na de eerste golf van de opwarming van de Aarde, als het organische materiaal in de arctische toendra's ontdooit en wordt afgebroken.

Alsof koolstofdioxyde en methaan al niet genoeg zijn om de warmtebalans van de Aarde te verstoren, heeft de mens ook nog CFK's geproduceerd, een groep verbindingen die op grote schaal wordt gebruikt in plastics, industriële processen, koelkasten en luchtverversingsinstallaties. Pas sinds kort zijn CFK's in spuitbussen verboden. Ieder CFK-molekuul kan tien- tot twintigduizend keer meer warmte absorberen dan een molekuul koolstofdioxyde, en de concentratie CFK's in de atmosfeer neemt jaarlijks met elf procent toe. Over deze

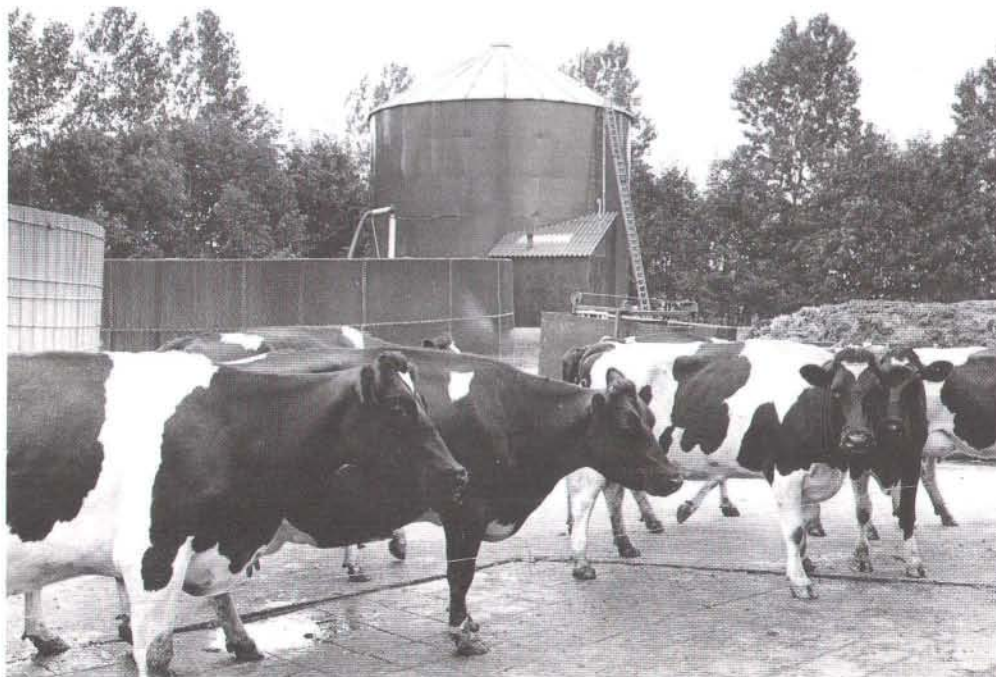


7

6. Koeien dragen in hun maag bacteriën die methaan produceren. Door dit brandbare biogas als energiebron aan te wenden bespaart de boer niet alleen op zijn eigen stookkosten, maar werkt hij tegelijkertijd mee de uitstoot van dit broeikasgas te verminderen.

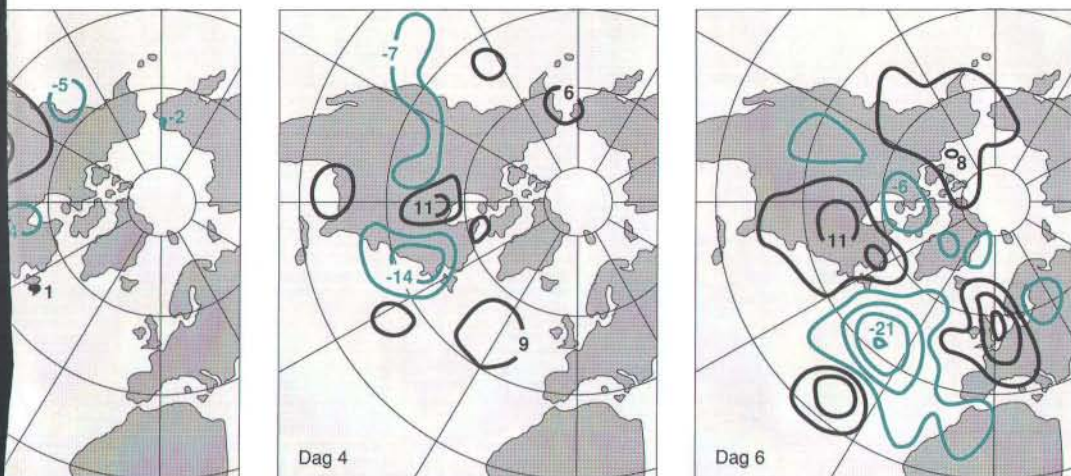
7. De moeilijkheid om een klimaatverandering adequaat in te schatten blijkt wel uit het groeiende verschil tussen het voorspelde en het werkelijke weer wanneer de voorspelling stoelt op licht afwijkende gegevens. Als kenmerk dient de hoogte waar een luchtdruk van 300 millibar

heerst. Geleerde omtrekken markeren de gebieden waar die luchtdruk zich op geringere hoogten voordoet dan voorspeld, zwarte waar die luchtdruk in feite hoger ligt. De getallen geven het hoogteverschil in meters weer.



6





rampzalige ontwikkeling zijn de onderzoekers die het broeikas effect bestuderen, het eens, evenals over de stijgende concentraties van koolstofdioxide en methaan. De vraag is alleen, welke gevolgen het broeikas effect precies zal hebben.

### Klimaatmodellen

Het klimaat op Aarde is van nature heel variabel en die wisselvalligheid kan gemakkelijk worden verward met veranderingen die het gevolg zijn van menselijke activiteit. Temperatuur, vochtigheid en alle andere facetten van het weer veranderen voortdurend als gevolg van schijnbaar verwaarloosbaar kleine verschuivingen in de baan en de schuine stand van de Aarde. Andere fluctuaties zijn het gevolg van verschillende geologische processen: grote wolken vulkanische as kunnen de Zon afschermen; door oprijzende bergketens kunnen heersende winden wegvallen en ijsmassa's kunnen zonlicht weerkaatsen, waardoor de planeet afkoelt. Zoals uit fossielen van temperatuurgevoelige micro-organismen blijkt, kunnen zulke cycli duizenden jaren, maar evengoed miljoenen jaren duren. Het blijkt buitengewoon moeilijk om onderscheid te maken tussen natuurlijke fluctuaties en door de mens veroorzaakte schommelingen.

Zelfs bij schattingen van de veranderingen in het klimaat van de laatste honderd jaar, waarvoor men over een schat aan weersgege-

vens beschikt, moeten onderzoekers een behoorlijke mate van onduidelijkheid op de koop toenemen, omdat deze gegevens voor het merendeel niet exact genoeg zijn om lange-termijn klimaatveranderingen te voorspellen. Voor het onderzoek naar het broeikas effect, waarbij een verandering van enkele graden per eeuw als bewijs voor een mondiale tendens wordt beschouwd, is de nauwkeurigheid van metingen van het allergrootste belang, maar niet alle metingen zijn met wetenschappelijke precisie uitgevoerd.

Als gevolg van het onvolledige karakter van de gegevens uit het verleden, kan men niet bepalen in hoeverre opwarming precies is toe te schrijven aan het verhoogde koolstofdioxidegehalte in de atmosfeer. In plaats daarvan hebben onderzoekers geprobeerd om het klimaat te voorspellen op grond van elementaire wetmatigheden – met computermodellen waarvan de vergelijkingen gebaseerd zijn op natuurkundige wetten die oceaen- en luchtstromingen reguleren. In tegenstelling tot weersmodellen, die van duizenden feiten afhangen maar alleen voor een beperkt gebied – en dan nog slechts enkele dagen vooruit – iets kunnen voorspellen, maken klimaatmodellen gebruik van een paar feiten die het klimaat bepalen (zoals de concentratie van koolstofdioxide, of de hoek van de Zon) om voorspellingen op lange termijn en voor grote gebieden te doen. Met supercomputers die honderden miljoenen berekeningen per seconde maken, zijn

de mondiale ontwikkelingen voor de eerstvolgende decennia te voorspellen.

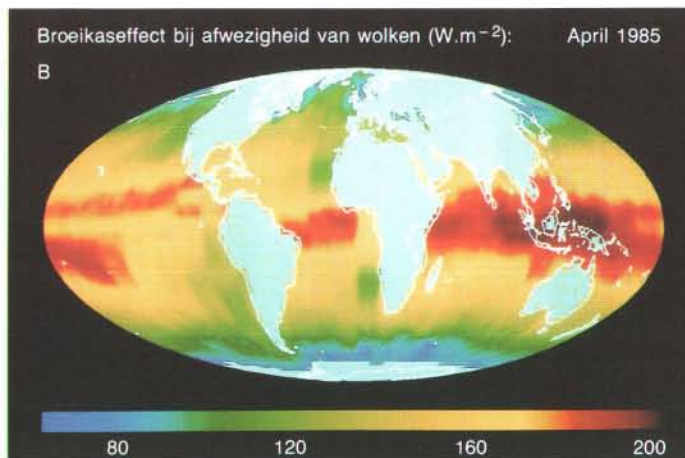
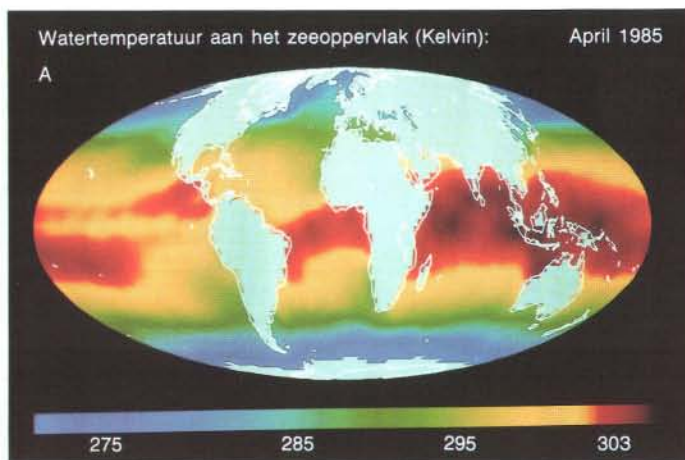
Met behulp van vijf klimaatmodellen, waaronder dat van het National Centre for Atmospheric Research, heeft men geprobeerd om te voorspellen wat er zal gebeuren als, zoals men verwacht, de hoeveelheid koolstofdioxide in de atmosfeer van de Aarde tegen het jaar 2050 verdubbeld zal zijn. Volgens alle vijf de modellen zullen de temperaturen twee tot zes graden Celsius stijgen. De tendens tot opwarming zal niet overal op Aarde even groot zijn; de grootste verandering zal naar verwachting optreden op de hogere breedtegraden, waar de toegenomen warmte de bovenste lagen van de ijskap zal doen smelten. Wanneer die eenmaal beginnen te ontdooien, zou de zeespiegel

enigszins stijgen, voldoende om ervoor te zorgen dat de west-Antarctische ijskap losraakt. Als die reusachtige gletsjer verder ontdooit en het oceaانwater uitzet (bij hogere temperaturen neemt de dichtheid af) zou de zeespiegel in enkele tientallen jaren zo'n 4,5 meter of meer kunnen stijgen. Belangrijke kuststeden als New York, Los Angeles, Londen, Venetië, Shanghai, Antwerpen en Rotterdam zouden tenslotte onder water kunnen verdwijnen.

De modellen laten zien dat de waterkringloop, de voortdurende verdamping en neerslag van water, waarschijnlijk bijzonder gevoelig is voor mondiale opwarming. Men verwacht dat er zeven tot vijftien procent meer sneeuw en regen zal vallen en tegelijk met de hoeveelheid neerslag ook de verdeling ervan zal verande-

8. Onderzoekers van de universiteit van Chicago slaagden erin om het broeikaseffect, dat wil zeggen de warmteabsorptie door de atmosfeer, daadwerkelijk zichtbaar te maken. Uit metingen van de temperatuur aan het zeeoppervlak (a) berekenden ze de hoeveelheid uitgestraalde warmte. Door deze te vergelijken met de naar de ruimte ontsnapende langgolvlige straling die door de ERBE-satelliet is geregistreerd, konden ze het verschil en daarmee het broeikaseffect bepalen (b). Dit bleek nauw samen te hangen met de oppervlaktetemperatuur. In April 1985 was het broeikaseffect bij afwezigheid van wolken boven zee gemiddeld  $146,3 \text{ Wm}^{-2}$ . Wolken zorgden in die maand voor een extra bijdrage van  $32,1 \text{ Wm}^{-2}$ .

9. De beteugeling van de uitstoot van koolstofdioxide is volgens velen noodzakelijk. Zonne-energie, zoals hier gebruikt ter verwarming van zwembadwater, vormt een alternatief voor olie en aardgas.







9

ren. De grootste toename vindt waarschijnlijk in de tropen plaats, in het bijzonder boven de oceanen rond de evenaar en aan de naar de polen gekeerde kant van de huidige regenzones op gemiddelde geografische breedte. Canada en Siberië zouden ongekend warm en vochtig, het Amerikaanse midden-westen waarschijnlijk droger worden. Zelfs klimatologen die de opvattingen van de Amerikaanse natuurkundige J. Hansen over het optreden van de mondiale opwarming bestrijden, zijn het erover eens dat de zomer van 1988 op zijn minst een generale repetitie vormde. Hansen bestudeerde als medewerker van de NASA de  $\text{CO}_2$ -rijke atmosfeer van Venus en is een fanatiek aanhanger van de theorie dat de toename van koolstofdioxide in de atmosfeer een bedreiging voor de mensheid vormt.

### Terugkoppeling

Toch moeten we bij het beschouwen van deze dramatische scenario's voorzichtig zijn: de modellen zijn niet volledig betrouwbaar. Een probleem is dat het systeem Aarde in zijn tota-

liteit te complex is om gereduceerd te worden tot een paar wiskundige vergelijkingen, hoe zorgvuldig die ook zijn opgesteld. Hoewel iedere wolk, bergketen, fabriek en luchtstrooming het weer kan beïnvloeden, kunnen de meeste van zulke factoren niet verwerkt worden in een model en nog veel minder door een computer met een beperkt vermogen worden berekend. Elk van de ongeveer 2000 sectoren waarin klimatologen de wereld hebben verdeeld is ongeveer vijf keer zo groot als Nederland, maar wordt desondanks door een klein aantal variabelen — temperatuur, vochtigheid, atmosferische druk en dergelijke — weergegeven. De modellen weerspiegelen dus niet de werkelijke, lokale weersgesteldheid.

Het lijkt al een te zware opgave om in de modellen de vele aspecten van het huidige klimaat, die het weer in de voor ons liggende jaren kunnen beïnvloeden, te verdisconteren. Maar zelfs als dit zou lukken dan zou het nog steeds moeilijk zijn om rekening te houden met de terugkoppelingseffecten van de klimaatveranderingen zelf, dat wil zeggen met de manier waarop afzonderlijke facetten van

mondiale opwarming de algehele trend kunnen gaan beïnvloeden. Sommige effecten van die terugkoppeling zullen de opwarming versnellen. Als broeikasgassen een grotere rol spelen bij het smelten van de ijskappen bijvoorbeeld en de oceanen stijgen, nemen de hoeveelheden ijs en sneeuw, die de warmte terugkaatsen, af, waardoor de hele planeet warmer zal worden dan men op grond van de ophoping van broeikasgassen alleen voorspelt. Anderszijds zullen de zeeën door absorptie van koolstofdioxide misschien de snelheid waarmee het gas zich in de atmosfeer ophoopt, verlagen. Het gas lost immers op in water en algen, plankton en andere micro-organismen gebruiken het bij hun fotosynthese. Diepe oceaanstromingen die grote hoeveelheden warmte (afkomstig van zonlicht) transporteren, vormen misschien een andere factor in de voorspellingen. Doordat ze zich over de wereld verplaatsen, zouden ze de klimaatverandering snel van het ene gebied naar het andere kunnen overbrengen.

Door het stijgen van de temperatuur op Aarde zou ook het wolkendek, dat al zestig procent van het aardoppervlak als een deken bedekt, dikker kunnen worden, omdat er bij warm weer meer water verdampt. Maar wegens het ontbreken van gedetailleerde informatie over de aard en de mate van de bewolking, valt er te twisten over de rol die deze factor speelt binnen het grotere wiskundige kader van de opwarming. Het is tot nog toe zelfs onmogelijk gebleken om in computermodellen tegelijkertijd onze kennis van de terugkoppelingseffecten, het wolkendek (dat zich van uur tot uur vormt en weer oplost), de plantengroei (waarvan aard en hoeveelheid in de loop van seizoenen en decennia veranderen) en de oceanen (waarin veranderingen duizenden jaren kunnen vergen) te verwerken.

Bij de enorme hoeveelheid gegevens over het weer op Aarde en de talrijke onzekerheden over de manier waarop de opwarming van de Aarde zal plaatsvinden, kunnen klimatologen slechts hun best doen om het klimaatsysteem zodanig te vereenvoudigen dat het de werkelijke verandering enigszins benadert. Natuurlijk zouden ze graag willen weten hoe betrouwbaar hun modellen zijn, maar de enige perioden waarin een vergelijkbare klimaatverandering is opgetreden, liggen in een zeer ver verleden waarvan geen volledige gegevens bekend zijn. Men kan in een model de omstandigheden die

vermoedelijk in die tijd heersten, inbouwen en dan kijken of het model een realistische verandering in de temperaturen op Aarde geeft. Maar betrouwbare meteorologische informatie uit het verleden is beperkt en maar weinig voorspellingen laten zich verfiëren.

## Preventie

Met de onzekerheid in wetenschappelijke kringen over de mate van opwarming van de Aarde gaat een hoge mate van politieke besluiteloosheid gepaard. Die besluiteloosheid komt voor een deel voort uit bezorgdheid over de kosten die beheersing van de productie van broeikasgassen met zich meebrengt, en gedeeltelijk uit de wetenschappelijke verdeeldheid zelf.

Alle voorgestelde maatregelen, van het installeren van katalysatoren in auto's, het stopzetten van de vernietiging van het regenwoud, het inperken van de CFK-productie en het ontwikkelen van alternatieve energiebronnen,

10. Amersfoort aan zee. Sommige klimaatmodellen voorspellen deze stad een toekomst als wereldhaven.





zouden beslist de uitstoot van broeikasgassen verminderen. Deze maatregelen zullen echter duur zijn en drastische veranderingen vereisen van de manier waarop miljarden mensen leven en werken. Dus zal het op zijn zachtst gezegd moeilijk zijn, om alle landen ervan te overtuigen dat het verstandig is om zulke veranderingen door te voeren.

Het is naïef om te denken dat Derde Wereldlanden, met hun snel groeiende bevolking, in zouden stemmen met een vermindering van de op koolstof gebaseerde energiebronnen en methaangebonden voedselbronnen, zonder de toezegging dat er andere hulpbronnen beschikbaar zullen komen. Daarenboven staan ondanks hun materiële voorsprong de drie grootste producenten van broeikasgassen, de Verenigde Staten, de Sovjetunie en West-Europa, niet te trappelen om hun eigen economieën in zekere mate af te remmen. En sommige noordelijke landen, zoals Canada en de Sovjetunie, zijn misschien wel gebaat bij een klimaatverandering die hen mildere temperaturen en meer regenval belooft. Politici rechtvaardigen hun aarzeling bovendien door te stellen dat wetenschappelijke onderzoekers het zelf on-

eens schijnen te zijn over de verwachte opwarming van de Aarde. Maar daaruit blijkt dat ze niet begrijpen waar het om gaat. Er zijn maar weinig klimatologen die bestrijden dat de miljarden tonnen koolstofdioxide, methaan en CFK's die ieder jaar in de atmosfeer terechtkomen, uiteindelijk tot een warmer klimaat zullen leiden. Tegen de tijd dat de wetenschap een volledig beeld heeft – wanneer modellen en gegevens zozeer verfijnd zijn dat we precies weten waar en hoeveel het klimaat zal veranderen – is het misschien te laat om een wereldwijde ramp te voorkomen, in het bijzonder wanneer de stijging van de zeespiegel zich doorzet.

Het nu uitstellen van maatregelen zou wel eens de allerduurste beslissing kunnen betekenen. We houden er ook geen brandweer op na omdat we zeker weten dat er brand komt, maar omdat er een redelijk grote kans bestaat op brand. Ondanks het feit dat we niet precies kunnen schatten hoe sterk een virus zich zal verbreiden als we het zijn gang laten gaan, vaccineren we grote delen van de bevolking. Waarom zouden we het broeikaseffect anders benaderen, terwijl dat niet alleen gebouwen of mensen bedreigt, maar onze hele planeet?

Dit artikel verscheen in het afgelopen jaar in het september/oktobernummer van *The Sciences*, een uitgave van de New York Academy of Sciences. Het werd voor ons vertaald door mw drs C. Sykora uit Wageningen.

#### Literatuur

- Okken PA. Is het broeikaseffect te vermijden? *Natuur en Techniek* 1988; 56: 3, 210-219.  
Stout G. Ozongat als reactievat. *Natuur en Techniek* 1989; 57: 9, 702-713.

#### Bronvermelding illustraties

- ESOC, Darmstadt, BRD: 2.  
U. Schotterer, Bern, Zwitserland: 4.  
P. Bucher, Bern, Zwitserland: 5.  
CEA, Rotterdam: 6, 9.  
ECMWF, Reading, GB: 7.  
A. Raval en V. Ramanathan, Chicago, VS/Nature, Londen, GB: 8.  
Karl Streuli/Arcadia filmproducties, Bloemendaal: 10.



# REGELGENEN



Hoe ontstaat uit een bevruchte eicel uiteindelijk een volledig organisme met talrijke verschillende cellen? Bij dit probleem van de embryogenese gaat het om de genen die deze normale ontwikkeling reguleren, de regelgenen, waarvan de structuur en de functie tot nu toe alleen bij fruitvliegjes bekend waren. We willen de rol van de regelgenen nu ook bij muizen, bij zoogdieren dus, ophelderen. Dat kan door een techniek waarmee genen, die tevoren doelbewust zijn veranderd, kunnen worden binnengesmokkeld in de geslachtscellen van een muis. Niet alleen de normale, geregleerde groei van cellen, weefsels en organen zal door dit onderzoek begrijpelijker worden; we verwachten ook inzicht in de moleculaire oorzaken en mechanismen van de ongebreidelde groei van tumorcellen. Misschien opent dat nieuwe perspectieven voor de behandeling van kanker.

De embryonale ontwikkeling van een muis begint met een bevruchte eicel. Die wordt hier aangeprikt met een hele dunne glazen injectienaald, om 'vreemd' DNA toe te voegen. De kleine foto's laten een muize-embryo in het twee- en viercellig stadium en een blastocyst zien.

## MANAGERS VAN DE CELDIFFERENTIATIE

**Walter Frese**  
*Max-Planck-Gesellschaft  
München*

**Peter Gruss**  
*Max-Planck-Instituut voor biofysische chemie  
Göttingen*





Alle levende wezens dragen hun erfelijke bouwplan met zich mee in al hun cellen, in de vorm van desoxyribonucleïnezuur, of kortweg DNA. Dat zijn lange molekuulketens, bestaande uit slechts vier bouwstenen, de *nucleotiden*. Het DNA is te beschouwen als molekulaire alfabet: in de nucleotidenvolgorde liggen de aanwijzingen voor de bouw van eiwitten. Daarbij vormen steeds drie opeenvolgende nucleotiden (*triplet*) een 'woord'; ieder triplet staat voor één van de twintig verschillende aminozuren, waaruit de eveneens ketenvormige eiwitten zijn opgebouwd.

Enkele tientallen tot enkele duizenden van zulke tripletten vormen een gen, als het ware een 'zin' waarin het volledige bouwplan van een bepaald eiwitmolekuul is verwoord: de nucleotidenvolgorde van een gen wordt vertaald in een reeks van aminozuren die op hun beurt een volledig eiwit vormen. De volgorde en de aard van de afzonderlijke aminozuren bepalen de structuur en daarmee ook de functie van het eiwit.

### Het archief in de celkern

Alle genen samen, dat wil zeggen alle in het DNA vastgelegde erfelijke informatie van een organisme, noemen we het *genoom*. Iedere cel van een organisme bezit een volledige kopie van dit genoom; het ligt in de celkern, afgescheiden van de overige celinhoud. Uit dit 'genetische archief' kan de cel naar behoefte kopieën van afzonderlijke genen bestellen, om met behulp daarvan de noodzakelijke eiwitten te maken.

Nu bestaat ieder organisme, afgezien van de eencelligen, uit een groot aantal gespecialiseerde cellen, die zich zowel qua bouw als qua functie van elkaar onderscheiden. Iedere cel heeft dan ook zijn eigen eiwitten nodig. Zo gebruikt bijvoorbeeld een levercel andere informatie uit het genoom dan een zenuwcel.

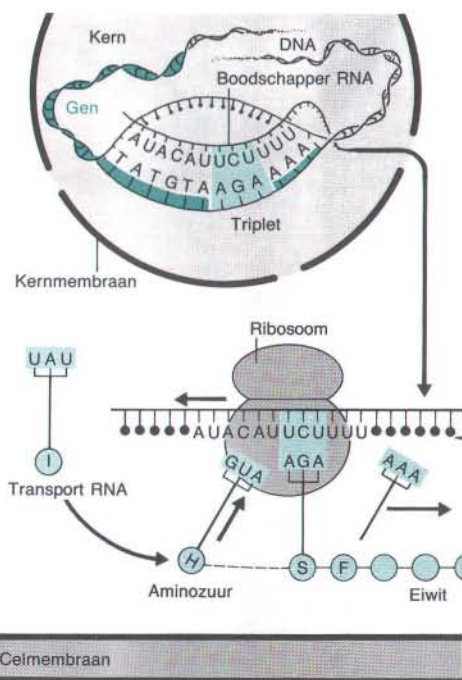
Dat brengt ons op een fundamentele kwestie. In het genoom van een zoogdier, dus ook in dat van mensen, ligt de informatie voor zo'n vijftig- tot honderdduizend verschillende eiwitten opgeslagen. Elke cel heeft echter maar een klein deel van deze informatie nodig. De vraag is dus: hoe 'weten' een levercel en een zenuwcel welke van de vele duizenden genen ze moeten mobiliseren?

We komen nu op het terrein van de embryogenese: de groei en ontwikkeling van een organisme uit een bevruchte eicel. Uit de eicel ontstaan via deling steeds nieuwe cellen die aanvankelijk nog niet gedifferentieerd, dus nog niet gespecialiseerd zijn. Pas vanaf een bepaald tijdstip treedt differentiatie op. Dan scheiden zich de wegen van de tot dan toe uniforme cellen en ontwikkelen zich de verschillende weefsels en organen.

Het is de vraag hoe en waardoor dit vaste ontwikkelingspatroon veroorzaakt en gereguleerd wordt. Wat bepaalt dat op het juiste tijdstip en op de anatomisch correcte plaats, de ene tot dan toe 'neutrale' cel zich ontwikkelt tot een levercel en de andere tot hersencel? En hoe wordt de groei van een orgaan of weefsel gereguleerd? Waarom houdt bijvoorbeeld de lever op met groeien zodra hij een bepaald formaat heeft bereikt?

### Regelgenen

De ontwikkeling van bevruchte eicel tot volledig organisme is het gevolg van een reeks van keuzen. Aangezien alle cellen, afgezien van enkele uitzonderingen zoals geslachtscellen of ro-





de bloedlichaampjes, over dezelfde erfelijke informatie beschikken, kan differentiatie alleen maar optreden doordat verschillende deelprogramma's van het hele genoom worden uitgevoerd. De informatie op grond waarvan iedere cel een keus maakt voor het ene of het andere programma, moet eveneens in het genoom aanwezig zijn. Er blijken bijzondere genen te bestaan die deze keuzen regelen, die, met andere woorden, doelgericht bepaalde genen mobiliseren en daardoor garanderen dat iedere cel zich volgens zijn eigen bouwplan ontwikkelt.

Zulke genen, die zorgen voor de rolverdeling binnen het zich ontwikkelende organisme, heten *regelgenen*. Zij vormen het onderzoeksobject van de ontwikkelingsbiologie. Het 'huisdier' van de ontwikkelingsbiologen is het fruitvliegje *Drosophila*. De afgelopen tien jaar heeft onderzoek aan dit insect geleid tot fundamentele kennis over de structuur en de functie van regelgenen.

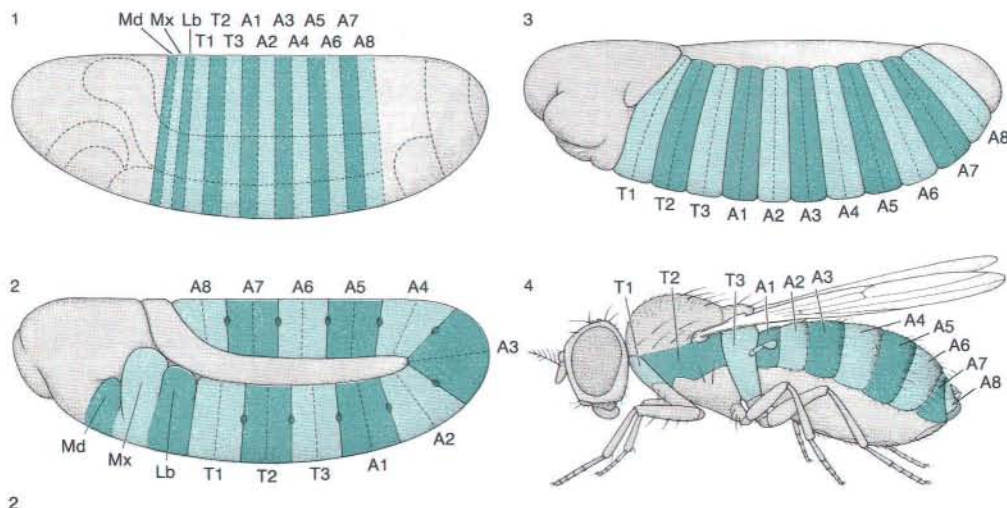
Aanvankelijk gebruikte men bij dat onderzoek methoden uit de klassieke genetica. Men stelde eieren of larven van fruitvliegen bloot aan ioniserende straling of giftige stoffen en wakte daarmee mutaties op in het erfelijke materiaal. Er veranderde wat in de nucleotiden-

volgorde van de genen. Op die manier kreeg men mutanten, vliegen met afwijkende eigenschappen, waaronder exemplaren waarbij de ontwikkeling gestoord was. Er waren bijvoorbeeld vliegen waaraan bepaalde lichaamsdelen ontbraken of die in plaats van antennen een paar poten op hun kop droegen.

Aan dergelijke gestoorde ontwikkelingen moesten mutaties van de regelgenen ten grondslag liggen. Zo viel in de eerste plaats uit bepaalde afwijkingen de normale functie van de gemuteerde en daardoor uitgevallen genen af te leiden. Vervolgens kon men met behulp van molekulaairbiologisch onderzoek de gemuteerde 'tekstdelen' in het genoom opsporen. Zo leerde men de plaats van de regelgenen kennen en kwamen zij voor nader onderzoek naar hun structuur en functie beschikbaar.

### Gespreide activiteit

Men spoorde zo ongeveer 150 genen op, die elk op een bepaald tijdstip gedurende de rijping van het ei en de ontwikkeling van het embryo de normale ontwikkeling bij de fruitvlieg *Drosophila* reguleren. Er zijn drie groepen: *maternale effectgenen*, *segmenteringsgenen* en



1. De code voor de aminozuurvolgorde van een eiwit is vastgelegd in een gen in het DNA. Het boodschapper-RNA, een 'afgietsel' van het gen, wordt in een

ribosoom herkend door transport-RNA's. Zij dragen elk een aminozuur met zich mee, die tot een eiwit aan elkaar worden gekoppeld.

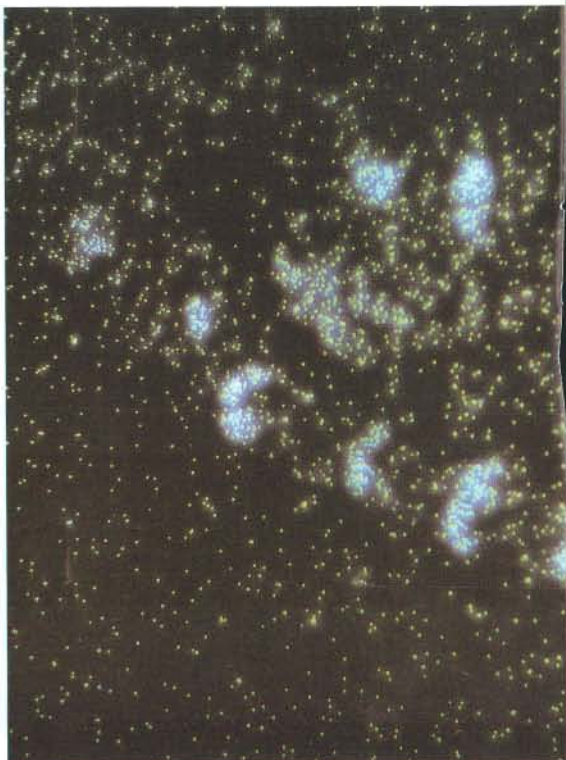
2. Regelgenen reguleren de oriëntatie, segmentatie en orgaanontwikkeling in een fruitvliegembryo. Md, Mx en Lb zijn kopsegmenten, T zijn borststukseg-

menten en A zijn achterlijfsegmenten. Tussen stadium 3 en de volwassen vlieg (4), liggen nog twee larvale stadia en een popstadium.

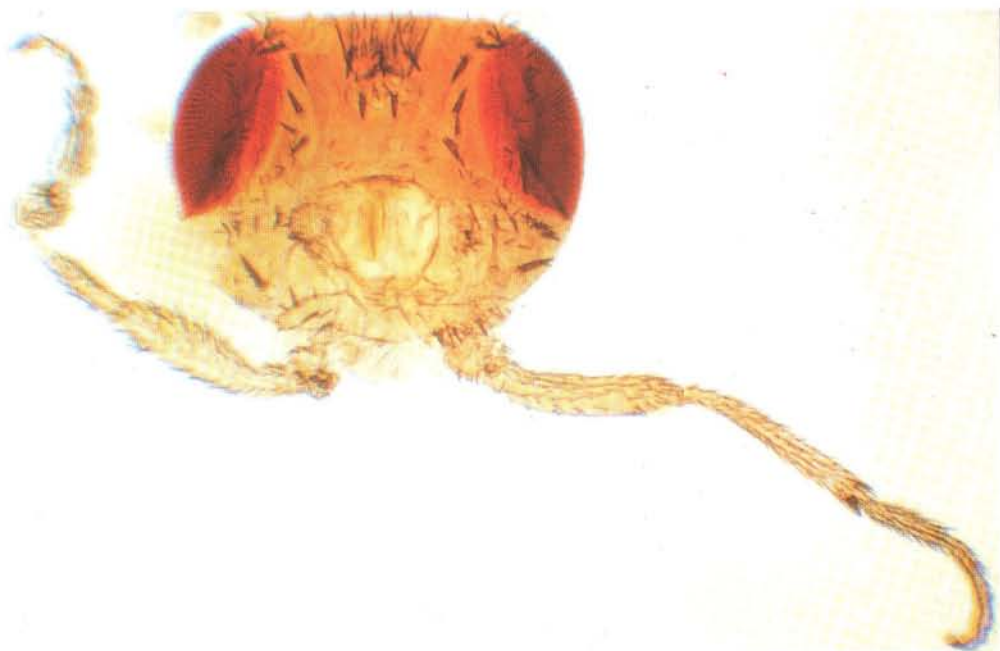
*homeotische* genen, die op verschillende tijdstippen na elkaar actief worden.

De maternale effectgenen worden het eerst actief. Zij bepalen al in het rijpende, nog onbevuchte ei de positie en de richting van de lichaamsas van het embryo. Dan wordt in het bevruchte ei het 'gerichte' embryo door de segmentatiegenen als het ware in mootjes opgesplitst. Het wordt eerst grofweg in een kop-, borst- en achterlijfgebied gescheiden en vervolgens verder onderverdeeld in nog kleinere lichaamssectoren. De homeotische genen tenslotte wijzen elk van deze segmenten een eigen rol toe, bijvoorbeeld als oorsprong van antennen, vleugels of een paar poten.

Genen werken via de eiwitten waarvoor zij de informatie leveren. Dat geldt ook voor de regelgenen: zij oefenen hun regelfunctie uit via zogenaamde *DNA-bindende* eiwitten. Deze eiwitten onderscheiden zich in twee opzichten van andere. Ten eerste kunnen ze binnendringen in de uitstekend afgeschermd celkern, waar het erfelijke materiaal ligt. Ten tweede kunnen deze eiwitten zich op bepaalde plaatsen van het DNA vasthechten, en dat is bepalend voor hun functie. Deze aanhechtingsplaatsen op het DNA, die ieder gekenmerkt

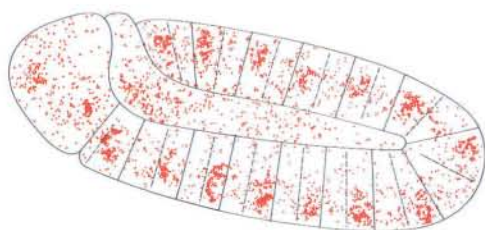
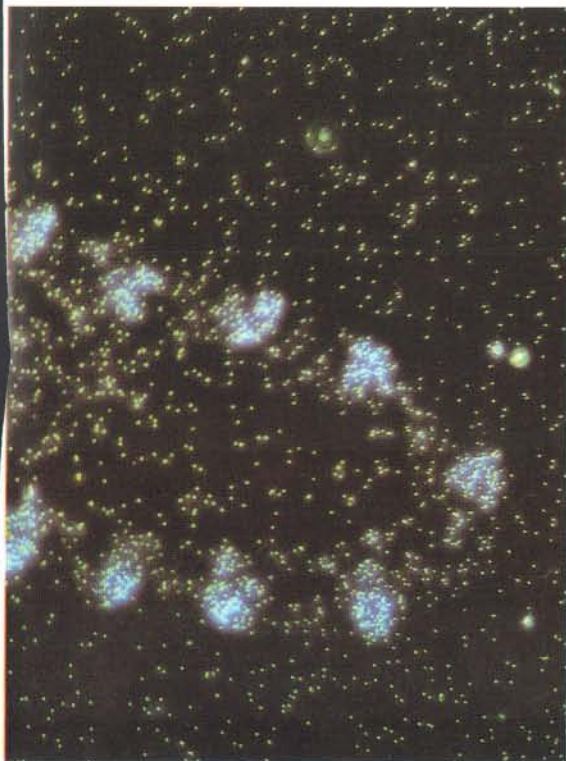


4



3





5

3. Antennapedia is een homeotisch gen in *Drosophila*. Door een mutatie van dit gen is de ontwikkeling van deze vlieg gestoord en heeft hij poten op de plaats waar zijn antennes horen.

4 en 5. In een zes uur oud *Drosophila*-embryo is de activiteit van een gen zichtbaar gemaakt met oplichtende radioactieve kopieën ervan. Duidelijk is te zien dat het embryo in segmenten verdeeld is.

zijn door een bijzondere nucleotidenvolgorde, werken als een soort schakelaar: zodra het eiwit zich eraan vasthecht, wordt het erachter gelegen gen in- of uitgeschakeld. Zo bepalen de DNA-bindende eiwitten welke erfelijke informatie tot uitdrukking komt en daarmee welke eiwitten een cel maakt.

### Slot-sleutelprincipe

Het gaat hier om een slot-sleutelprincipe. Om doelgericht te kunnen functioneren, moeten de DNA-bindende eiwitten precies passen op de nucleotidenvolgorde waaraan ze zich vasthechten. Bovendien moeten ze bepaalde structuurkenmerken vertonen, die hen als een soort wachtwoord toegang verschaffen tot de celkern, hun werkruimte, die door een membraan van de rest van de cel gescheiden is.

De informatie voor deze sleutelstructuren moet in overeenkomstige nucleotidenvolgorde in de regelgenen aanwezig zijn. En dat is nu precies wat structuuronderzoek heeft aangetoond: verschillende regelgenen van *Drosophila* vertonen altijd dezelfde nucleotidenvolgorde op een bepaald gedeelte, de zogenaamde *homologe sequenties*. Drie zulke nucleotidenvolgorde, die ieder in verschillende regelgenen voorkomen, heeft men kunnen aantonen en van een naam voorzien: *homeobox*, *paired box* en *finger-structure*.

Daarmee had men in zekere zin het keurmerk van de regelgenen ontdekt. Want deze homologe sequenties coderen voor de sleutelposities van de DNA-bindende eiwitten en bepalen dus hun functie als regelgen. Anders gezegd, ze bepalen de functie als regulator van de embryonale ontwikkeling van de fruitvlieg.

Nu was het onwaarschijnlijk dat *Drosophila* het patent zou bezitten op dit regelmechanisme van de ontwikkeling. Men zocht daarom ook in het erfelijke materiaal van andere organismen naar regelgenen, waarbij men de homologe sequenties van *Drosophila* als een soort sjabloon gebruikte. En inderdaad: zowel in het genoom van kikkers als in dat van zoogdieren trof men nucleotidenvolgorde aan die sterk overeenkwamen met *homeobox*-, *paired-box*- en *finger-structure*-sequenties. Dus vormden deze homologe sequenties zogenaamde geconserveerde genbestanddelen: erfelijke informatie die lang geleden ontstaan is en in de loop van de evolutie vrijwel onveranderd bewaard

	1														15	
Muis		Lys	Arg	Gly	Arg			Tyr	Thr	Arg	Tyr	Gln				Glu
Kikker	Arg	Lys	Arg	Gly	Arg	Gln	Thr	Tyr	Thr	Arg	Tyr	Gln	Thr		Leu	Glu
Fruitvlieg	Arg	Lys	Arg	Gly	Arg	Gln	Thr	Tyr	Thr	Arg	Tyr	Gln	Thr		Leu	Glu

	16														30	
Muis	Leu	Glu	Lys	Glu	Phe	His	Phe	Asn	Arg	Tyr	Leu		Arg		Arg	
Kikker	Leu	Glu	Lys	Glu	Phe	His	Phe	Asn	Arg	Tyr	Leu	Thr	Arg	Arg	Arg	
Fruitvlieg	Leu	Glu	Lys	Glu	Phe	His	Phe	Asn	Arg	Tyr	Leu	Thr	Arg	Arg	Arg	

	31														45	
Muis	Arg		Glu		Ala			Leu		Leu	Thr	Glu	Arg	Gln	Ile	
Kikker	Arg	Ile	Glu	Ile	Ala	His		Leu	Cys	Leu	Thr	Glu	Arg	Gln	Ile	
Fruitvlieg	Arg	Ile	Glu	Ile	Ala	His	Ala	Leu	Cys	Leu	Thr	Glu	Arg	Gln	Ile	

	46														60	
Muis	Lys	Ile	Trp	Phe	Gln	Asn	Arg	Arg	Met	Lys		Lys	Lys			
Kikker	Lys	Ile	Trp	Phe	Gln	Asn	Arg	Arg	Met	Lys	Trp	Lys	Lys	Glu	Asn	
Fruitvlieg	Lys	Ile	Trp	Phe	Gln	Asn	Arg	Arg	Met	Lys	Trp	Lys	Lys	Glu	Asn	

6

6. Een homeobox is een genetische sequentie die voor een aantal regelgenen en bij verschillende organismen nagenoeg hetzelfde is. Ze codeert voor ongeveer 60 aminozuren, die hier voor een muis, een kikker en een fruitvlieg zijn weergegeven.

7. Het zichtbare gevolg van een defect regelgen is de geknikte staart van deze muizen. Deze afwijking berust op een mutatie van een regelgen, dat de ontwikkeling van de wervelkolom reguleert.

gebleven is. Bij *Drosophila* en vermoedelijk ook bij andere organismen, is deze informatie noodzakelijk voor de embryonale ontwikkeling.

Uit het feit dat deze sequenties structureel behouden waren gebleven, durfde men echter niet zonder meer af te leiden dat dus ook de functie ervan wel bewaard gebleven zou zijn. Want *Drosophila* is, ontwikkelingshistorisch beschouwd, een 'oldtimer'. Wat voor *Drosophila* geldt, hoeft niet op te gaan voor organismen die pas veel later in de evolutie zijn ontstaan, met name zoogdieren. De homologe sequenties zouden, hoewel ze structureel bewaard gebleven waren, al lang hun oorspronkelijke betekenis verloren kunnen hebben, dus zoiets als een 'genetische blinde darm' kunnen vormen.

We willen bewijzen dat deze structureel bewaard gebleven nucleotidenvolgorde ook hun functie hebben behouden; dat zij ook in hogere organismen nog dezelfde sleutelrol vervullen voor de embryonale ontwikkeling als bij *Drosophila*. In het genoom van muizen zijn drie genenfamilies geïdentificeerd die ieder gekenmerkt worden door homologe DNA-volgorde die zeer veel overeenkomst vertonen met de van *Drosophila* bekende homeobox-, paired-box- en finger-structure-genen.

Als deze homologe genen werkelijk iets te maken zouden hebben met de embryonale ontwikkeling van de muis, zouden ze in het embryo ieder op een bepaald tijdstip en bovendien in duidelijk afgebakende weefsels actief moeten zijn. Actief zijn betekent: van het

DNA worden kopieën gemaakt die worden afgelezen en in eiwitten omgezet. Dit kopieerproces, transcriptie genaamd, is te volgen als men de nucleotidenvolgorde van de gekopieerde genen kent. Men kan dan de genkopieën – de transcriptieproducten – met radioactieve stoffen markeren en ze zo opsporen.

Deze ruimtelijke en tijdelijke spreiding van activiteit duidt erop dat de homologe genen een rol spelen bij de verwezenlijking van het bouwplan, de ontwikkeling van organen en weefsels van het muize-embryo. Maar daarmee was het nog niet bewezen, want daarvoor was net als bij *Drosophila* een direct verband tussen het uitvallen van zulke genen en uiterlijke afwijkingen nodig.

Met muizen kan men geen mutatie-experimenten doen zoals met fruitvliegen. De met behulp van straling of chemicaliën opgewekte mutaties treffen volkomen toevallig het een of andere gen. Het genoom van muizen is echter veel omvangrijker en ingewikkelder dan dat van fruitvliegen en het aantal nakomelingen bij de muis is veel en veel kleiner. De kans dat het 'grove geschut' van de klassieke genetica leidt tot bruikbare mutanten, waarbij men een uiterlijk zichtbaar defect zou kunnen herleiden tot het uitvallen van een enkel gen, is dan ook bijzonder klein.

### Een defect gen

We hadden echter geluk. In een bepaald gebied van het genoom van de muis konden we een gen opsporen, dat overeenkwam met de



paired-box-genen van *Drosophila*, één van de genen die overeenkomstig de vastgestelde activiteitspatronen een rol speelden bij de vorming van de wervelkolom in het muize-embryo.

In een lijst van reeds bekende muize-mutanten kwamen we een zogenaamd *undulated type* tegen, een muis met een geknikte staart en misvormingen van de wervelkolom. Bij deze muizestam waren al eerder mutaties waargenomen in precies dat gedeelte van het genoom waarin het paired-box-gen was aangetoond.

Nader onderzoek bevestigde het vermoeden: bij de undulated mutant was één van de nucleotiden in de paired-box-sequentie vervangen door een ander. Als gevolg van deze mutatie was in het door dit gen gecodeerde eiwit één aminozuur door een ander vervangen. Dit verkeerde eiwit leidde tot eenzijdig verdikte tussenwervelschijven en eenzijdig onvolledige wervels en daardoor tot de geknikte staart.

### Een lot uit de loterij

Daarmee was tenminste in een concreet geval een duidelijk verband aangetoond tussen een van de homeo-box genen van de muis en een

ontwikkelingsstoornis. Dit succes berust op een gelukkig toeval, dat nog het meeste lijkt op het winnen van de hoofdprijs in een loterij. Dat betekent echter dat een andere, niet van het toeval afhankelijk methode ontwikkeld moet worden, om de functie van de talrijke andere genen waarvan men vermoedt dat het regelen zijn te ontdekken. Dat is dan ook het doel van het lopende onderzoek.

Dat doel laat zich als volgt omschrijven: Het ontwikkelen van een werkwijze, die het mogelijk maakt om afzonderlijke genen doelbewust te muteren en vervolgens de functie van deze gemuteerde genen in het dier, in de muis dus, te toetsen. In plaats van het grove geschut van de genetica heeft men nu, bij wijze van spreken, precisiewapens nodig. Een paar jaar geleden moest zo iets nog als een utopie worden beschouwd. Maar intussen is het binnen bereik gekomen dankzij de vorderingen op twee verschillende terreinen van de biologie: de ontwikkelings- en de moleculaire biologie. In de eerste plaats is het binnen de ontwikkelingsbiologie gelukt om bij muizen zogenaamde embryonale stamcellen te isoleren en in een weefselkweek in stand te houden.





8

Zulke cellen treft men aan in de blastocysten, de kiemblazen, die zich bij zoogdieren in een vroeg stadium van de embryonale ontwikkeling uit de bevruchte eicel vormen. Op dat tijdstip heeft het embryo zich nog niet in de baarmoeder ingenesteld. De embryonale stamcellen vormen een nog ongedifferentieerd 'oerweefsel' waaruit later door differentiatie de verschillende weefsels en structuren van het organisme ontstaan. Het gaat dus om cellen die nog alle kanten op kunnen, in die zin dat ze zich tot bijvoorbeeld been-, lever-, zenuw- of geslachtscellen kunnen ontwikkelen.

### Zebamuizen

Met de mogelijkheid om zulke embryonale stamcellen uit de blastocyst van de muis te isoleren, werd tegelijk de voorwaarde voor een experiment geschapen dat de *pluripotentie* van deze cellen op indrukwekkende wijze bewijst. Men kan embryonale stamcellen isoleren uit een witte muis en deze inspuiten in de blastocyst van een zwarte muis. Deze gemengde



9

kiemblaas kan men vervolgens inplanten in de baarmoeder van een muis en deze muis baart dan jongen met een zebra-patroon.

Zulke zebamuizen kan men op het Max-Planck-Instituut voor biofysische chemie bekijken. Daarbij ziet men echter niet wat voor de onderzoekers nu juist het belangrijkste is: dat het zebrapatroon niet alleen in de vacht maar in alle weefsels van de muis aanwezig is, afhankelijk van het feit of de cellen van het weefsel uit een 'zwarte' of een 'witte' embryonale stamcel zijn ontstaan. Dat geldt ook voor de cellen van de kiembaan, dus de ei- of zaadcellen, en dat is nu precies wat de onderzoekers nodig hebben. Want dat betekent dat men door zebamuizen van een worp onderling te kruisen, muizen kan krijgen met alleen het genoom van de witte stamcellen, die in de blastocysten van de zwarte muis werden ingeplant.

En op dit punt wordt de vooruitgang van de moleculaire biologie belangrijk. Het is intussen namelijk mogelijk om de nucleotidenvolgorde van een enkel uit één cel geïsoleerd gen, hier en daar te veranderen en dit gemuteerde



8, 9, 10 en 11. De radioactief gemarkeerde kopieën van een paired-box-gen – bewijs van de activiteit ervan – zijn duidelijk zichtbaar in de staart van een muize-embryo (8 en 9).

Regelgenen spelen een rol bij de ontwikkeling van elk orgaan, ook de darm. In 10 en 11 is dat op dwarsdoorsnede te zien bij een 17 dagen oud embryo van een muis.



10



11

kortgeleden nog onbereikbaar geachte doel: de veronderstelde regelgenen van de muis direct op hun functie te toetsen. Het begint ermee dat men de gemuteerde genen eerst isoleert en dan in de homeobox-, paired-box- of finger-structure-sequenties afzonderlijke nucleotiden verwisselt. Vervolgens smokkelt men deze gemuteerde genen in de embryonale stamcellen van muizen binne. De stamcellen, waarin de gemuteerde genen in het genoom worden ingebouwd, injecteert men dan in een blastocyst. Deze blastocyst tenslotte plant men in een muis in.

De nakomelingen van deze muis bezitten wat betreft de regelgenen, een zebrapatroon. Dat wil zeggen: in een aantal van hun cellen, waaronder ook geslachtscellen, bevinden zich gemuteerde genen. Door de nakomelingen met elkaar te kruisen verkrijgt men uiteindelijk muizen waarvan het erfelijke materiaal uitsluitend afkomstig is van de embryonale stamcellen die in de blastocyst werden geïnjecteerd, dus van cellen met gemuteerde genen. En als deze genen de embryonale ontwikkeling reguleren, moeten deze muizen de daarmee samenhangende afwijkingen vertonen.



12

12. Deze zebramuizen hebben elk vier ouders. In de blastocysten van een witte muis werden embryonale stamcellen van een zwarte muis ingespoten. De vacht vertoont een zebrapatroon, dat ook in andere weefsels van deze muizen voorkomt.

gen vervolgens in de kern van een overeenkomstige cel in te planten. Daar wordt het gemuteerde gen met een kans van 1 op 150 op de plaats van het niet gemuteerde gen in het genoom ingebouwd. Door middel van deze techniek kan men ook gerichte mutaties van regelgenen in cellen tweewegbrengen.

Daarmee is de mogelijkheid geopend tot het

Men gaat dus precies omgekeerd te werk als bij *Drosophila*. Bij die vliegen kweekte men eerst mutanten en zocht dan naar de moleculaire-genetische oorzaak van de betreffende afwijking. Bij de muizen daarentegen veroorzaakt men eerst doelbewust een erfelijk defect en toetst daarna de uitwerking daarvan op het organisme.

De betekenis van dit onderzoek reikt veel verder dan het oorspronkelijke doel: het aantonen van de functie van homeobox-, paired-box en finger-structure-genen bij muizen. Het is de proef op de som voor de methode om heel gericht mutaties in cellen te bewerkstelligen. Want met deze methode kan men niet alleen genen waarvan men vermoedt dat ze een regelfunctie vervullen, testen; hij is ook te gebruiken bij andere bekende en geïsoleerde genen. Daarmee is de muis tot een waardevol proefdier geworden voor de genetica en de ontwikkelingsbiologie.

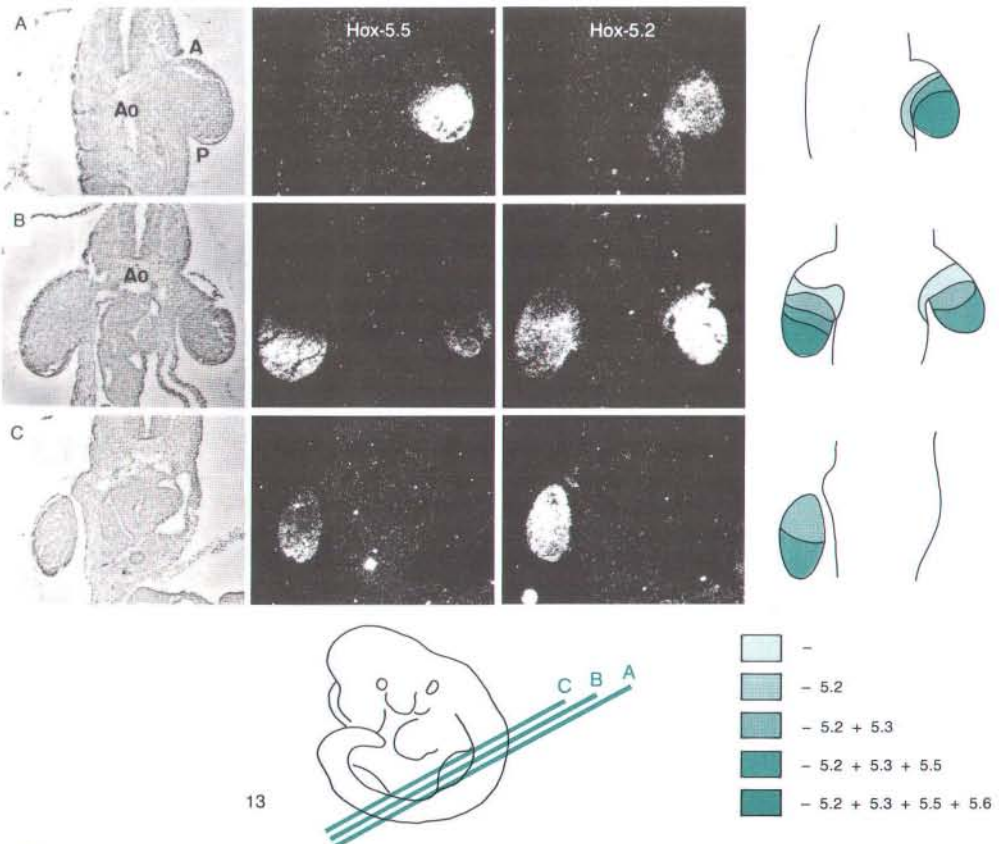
### Niet bij mensen

Anderszijds komt men met dergelijke methoden op heel gevoelig terrein. Want in principe zijn die natuurlijk ook bij mensen te gebruiken, bijvoorbeeld om defecte genen in bepaalde lichaamscellen uit te wisselen tegen normaal

functionerende genen en op die manier erfelijke afwijkingen te genezen.

Alleen de toepassing van de methode bij dierlijke cellen is voor ons bespreekbaar en dan ook gerechtvaardigd, omdat de methode zeer veelbelovend is: het onderzoek aan regulatiegenen geeft inzicht in de manier waarop de embryogenese bij zoogdieren wordt gereguleerd, hoe iedere cel zijn specifieke rol binnen het organisme krijgt toebedeeld. Daardoor zullen we ook kunnen begrijpen, hoe en waarom cellen soms uit die aangeboren rol vallen – waarom ze plotseling ongecontroleerd beginnen te groeien, ontaarden in tumorcellen en zich ongebreideld gaan delen.

In dit verband is de al veel langer bekende analogie tussen het ontstaan van kanker en embryogenese interessant: veel kankercellen lijken in zoverre op cellen uit een vroeg embryonaal stadium, dat ze geen duidelijke differentiatie vertonen. Het zijn cellen die ergens in





13. Het homeobox-5-gen (Hox-5) is een complex van een aantal kleine genen. Ze liggen, achter elkaar maar niet aansluitend, op één stuk DNA. Op de coupes A, B en C door de voorpoot van een tien dagen oud muize-embryo is de activiteit van een aantal Hox-5 genen zichtbaar gemaakt. Daaruit blijkt dat Hox-5.2 over de hele poot actief is en dat naar het uiteinde toe steeds meer Hox-5 genen een rol spelen.

14. Peter Gruss, een van de auteurs van dit artikel, bekijkt met een collega een elektroforese-strook, die informatie geeft over de nucleotidenvolgorde van een gen.



14

hun ontwikkeling zijn blijven steken en zich dan ongeremd vermeerderen of, anders gezegd, cellen waarvan het differentiatieprogramma ontregeld is.

Een ander voorbeeld vormen de verschillende oncogenen die in het erfelijke materiaal van zoogdieren en dus ook bij mensen voorkomen: bepaalde DNA-sequenties, waarvan activering tumorgroei veroorzaakt, maar waarvan de normale functie nog onbekend is. Na de regelingen zouden deze oncogenen het eerst in aanmerking komen voor het toetsen van hun functie met behulp van het muizenmodel.

En zoals zo dikwijls bij fundamenteel onderzoek, dat aanvankelijk waardenvrij en zonder bijgedachte aan mogelijke praktische toepassingen van de verkregen resultaten plaatsvindt, zou het toegenomen inzicht in de moleculaire processen van zowel de normale als de ongecontroleerde groei van cellen, tot nieuwe aanknopingspunten kunnen leiden voor de behandeling van tumoren.

Ontwikkelingsbiologen hebben dus alle reden om verder te werken aan hun 'muizentest'. Het is voor ons even vanzelfsprekend als onvermijdelijk, om ons tot dit model te beperken; met andere woorden, onszelf duidelijke grenzen te stellen. Ingerepen in menselijke geslachtscellen zijn principieel ontoelaatbaar.

#### Literatuur

- Gehring W.J. The molecular basis of development. *Scientific American* 1985; 253: 4, 136-147.  
 Poelmann R, Christ B, Wachtler F. Het ei van...? - Chi-maeren in de embryologie. *Natuur en Techniek* 1989; 57: 7, 542-553.

#### Bronvermelding illustraties

- Merwe Olowson/MPI voor biofysische chemie, Göttingen, D: 106-107  
 Walter Gehring/Biozentrum, Universiteit Basel, CH: 3, 4; 2, 5 en 6 naar Gehring  
 Filser/MPG, München, D: 7 en 14  
 Denis Duboule/EMBL, Heidelberg, D. Uit: *Nature* 1989; 342: 6251, 767-772: 13  
 De overige afbeeldingen zijn afkomstig van Peter Gruss.

Dit artikel is voor ons vertaald door mw drs C. Sykora uit Wageningen.

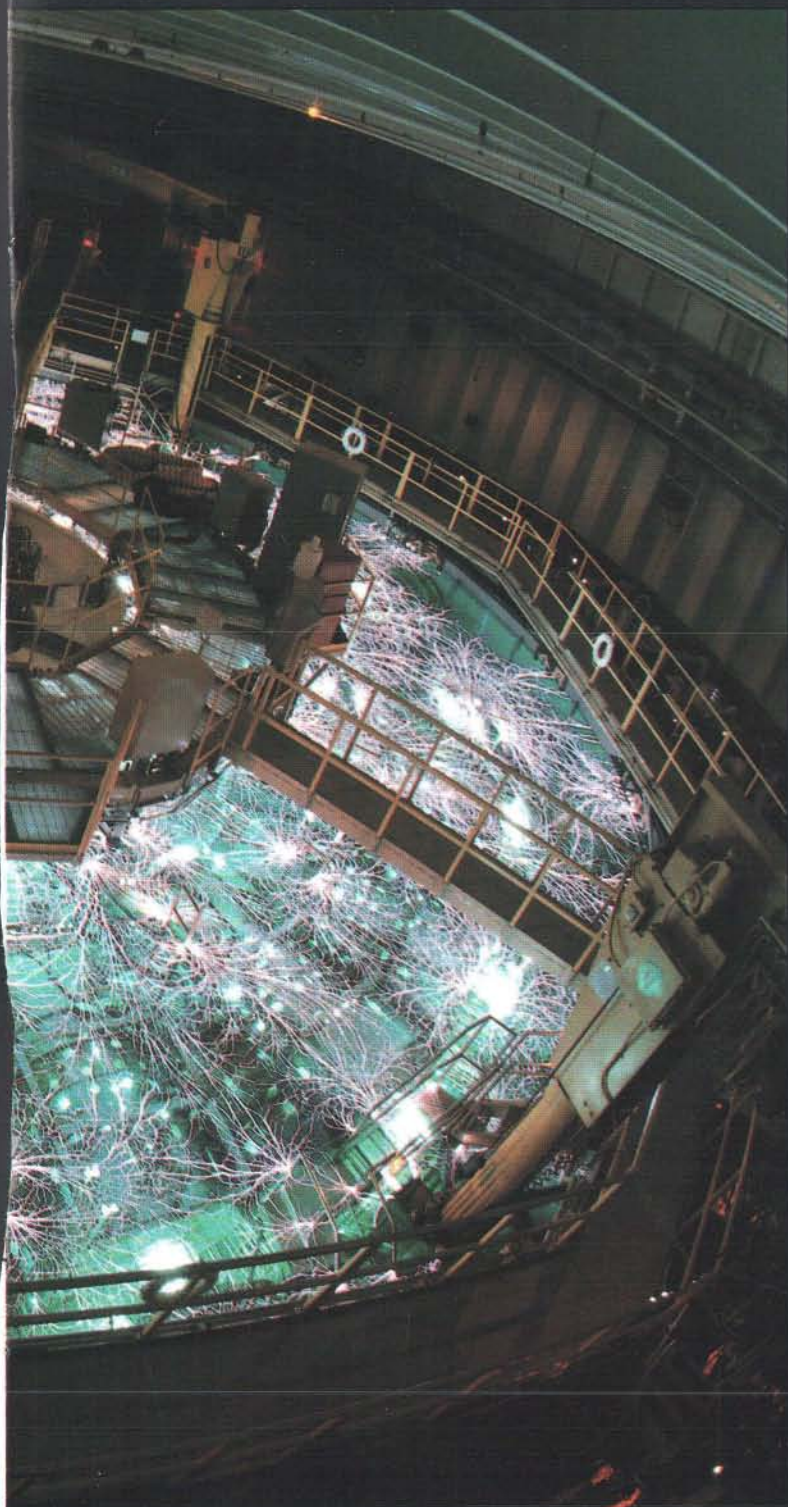
# ZON *op* AARDE

A.J.H. Donné en A.A.M. Oomens  
FOM-instituut voor plasmafysica 'Rijnhuizen'  
Nieuwegein

In de Sandia National Laboratories (New Mexico, VS) beschiet men deuterium-tritiumbolletjes met hoogenergetische ionenbundels in de hoop dat de dichtheid en de temperatuur in de bolletjes zo hoog worden dat kernfusie op zal treden. Met elke ionenbundel ontstaat een extreem sterk elektromagnetisch veld waardoor aan het oppervlak van het koelwater waarin de deeltjesversneller is ondergedompeld, de lucht ioniseert en zich elektrische ontladingen voordoen.

## trends in fusieonderzoek





Met de ontdekking van het koude-fusie-proces in maart 1989 leek het even of een onuitputtelijke energiebron binnen handbereik lag. Per kilogram grondstof komt bij het fusie-proces, het smelten van de kernen van twee waterstofisotopen tot helium, namelijk ruim tien miljoen keer meer energie vrij dan bij verbranding van fossiele brandstoffen. De grondstoffen voor de fusiereactor, water en lithium, zijn in overvloed aanwezig en als 'afvalproduct' komt een niet-radio-actief, niet-giftig en waardevol gas vrij: helium. De technologie voor het produceren en onderhouden van fusiereacties is uiterst complex. Daarom zullen fusiereactoren niet vóór 2030 op commerciële wijze energie produceren. Het opwindende onderzoek met als doel de ontwikkeling van een nieuwe, schone energiebron vindt echter op dit ogenblik plaats.



Alle energie die wij van de zon ontvangen is afkomstig van fusiereacties. In een fusiereactie versmelten twee atoomkernen met elkaar, waarbij één of meer nieuwe atoomkernen ontstaan met een wat geringere totale massa dan de gezamenlijke massa van de oorspronkelijke kernen. Het kleine massaverschil correspondeert met de vrijgekomen bindingsenergie volgens Einsteins formule  $E = mc^2$ . Het gemakkelijkst verloopt de fusiereactie tussen de kernen van deuterium (d) en tritium (t), beide isotopen van waterstof (afb. I-1). (In dit artikel duiden kleine letters atoomkernen aan en staan hoofdletters voor hele atomen.) Bij deze reactie wordt een neutron (n) gevormd met een energie van 14,1 MeV en een heliumkern ( $\alpha$ -deeltje) met 3,5 MeV:



De energie van de geproduceerde deeltjes kan dienen voor energie-opwekking in een fusiereactor. In één liter zeewater zit 33 milligram deuterium, wat op grond van bovenstaande reactievergelijking overeenkomt met de energie-inhoud van 360 liter benzine. Tritium is een isotoop die niet in de natuur voorkomt, maar in de reactor zelf kan worden gekweekt door bijvoorbeeld een lithiumhoudende koelvloeistof te gebruiken: De neutronen splijten dan de lithiumatomen in helium en tritium:

## Reactorcondities

We beschouwen de reactie (afb. I-1):



De kans op een fusiereactie is voor elk deeltje evenredig met het aantal deeltjes per volume-eenheid en met de reactiewaarschijnlijkheid  $R_{dt}$  bij de gegeven temperatuur van het plasma. Het aantal reacties per volume- en tijdseenheid wordt dan ook gegeven door het produkt  $n_d n_t R_{dt}$ . Hierin zijn  $n_d$  en  $n_t$  de deeltjesdichtheden van respectievelijk deuterium en tritium. Bij iedere reactie komt er een energie  $E_{dt}$  vrij. Voor het fusievermogen ( $P_{fusie}$ ) dat per volume-eenheid deuterium-tritiumplasma wordt geleverd, geldt dan:

$$P_{fusie} = n_d n_t R_{dt} E_{dt}$$

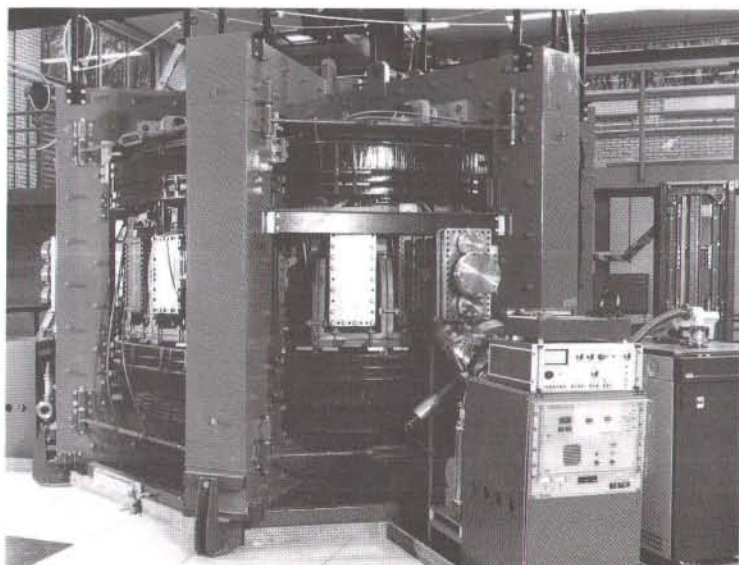
De fusiereacties kunnen echter pas in voldoende mate plaatsvinden bij een temperatuur in de orde van 100 miljoen Kelvin. Het zal daarom niet alleen van belang zijn om het plasma zo heet te krijgen, maar ook om het zo heet te houden. De kinetische energie van een plasma met  $n_e$  elektronen en  $n_d = n_t = 0,5 n_e$  deuterium- respectievelijk tritiumkernen met temperatuur  $T$  bedraagt per volume-eenheid:

$$E = 1,5 n_e k T$$

met  $k$  als de constante van Boltzmann. Zonder verwarming daalt de energie volgens een  $e$ -macht:

1. In het FOM-instituut voor Plasmafysica te Nieuwegein onderzoekt men in het kader van het Rijnhuizen Tokamak Project de deeltjes- en warmteverliezen in hete plasma's.

2. In de tokamak zorgt een spiraalvormig magnetisch veld ervoor dat het plasma vrijblijft van de reactorwand. Elektrische stroom door de primaire wikkeling wekt via een ijzeren transformator kern een plasma-stroom op. Deze vormt de secundaire wikkeling van de transformator en genereert een poloidaal magnetisch veld. Te zamen met het toroidaal veld dat dankzij extra magneet-spoelen evenwijdig aan de plasmastroom loopt, resulteert dit in het plasma-opsluitende magnetisch veld.





$$E = E_0 \exp(-t/\tau_E)$$

waarbij  $\tau_E$  de *energiebehoudtijd* wordt genoemd. Het energieverlies per tijds- en volume-eenheid is dus:

$$dE/dt = -E/\tau_E$$

Voor een energieproducerend plasma eisen we dat  $P_{fusie} > -dE/dt$ . Het energieverlies wordt dan (over)gecompenseerd door de energieproductie. Hieruit volgt met bovenstaande gegevens en na enig rekenwerk dat:

$$n_e \tau_E > 6kT/R_{dt} E_{dt}$$

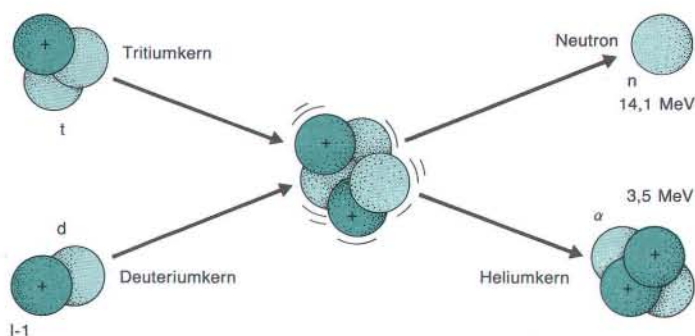
Het snelle neutron met de energie van 14,1 MeV zal

het reactorvat praktisch zonder botsingen verlaten en pas daarbuiten in de koelmantel zijn energie afgeven. Om het plasma op temperatuur te houden staat eigenlijk alleen het  $\alpha$ -deeltje met 3,5 MeV energie ter beschikking. Als we deze waarde en die van de reactiewaarschijnlijkheid bij honderd miljoen Kelvin ( $R_{dt} = 10^{-22} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) in de laatste formule invullen, krijgen we als ontstekingsvoorwaarde:

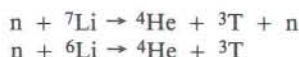
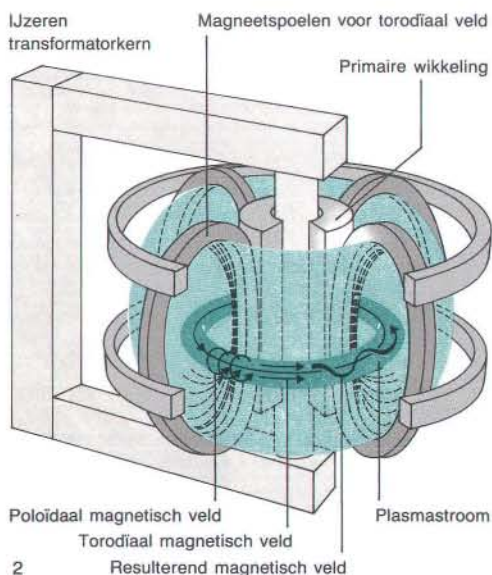
$$n_e \tau_E > 5 \cdot 10^{20} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$$

Omdat  $R_{dt}$  evenredig is met het kwadraat van de temperatuur, werkt men ook vaak met het triple-product:

$$n_e \tau_E T > 5 \cdot 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$



I-1. Bij de fusiereactie tussen deuterium- en tritiumkernen ontstaan, na een kortstondige samentrekking, een heliumkern ( $\alpha$ -deeltje) en een neutron. Het  $\alpha$ -deeltje komt vrij met een energie van 3,5 MeV, terwijl het neutron een kinetische energie van 14,1 MeV bezit.

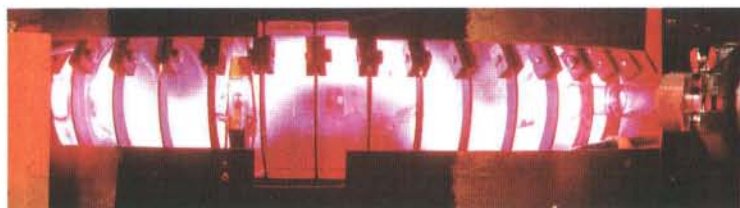
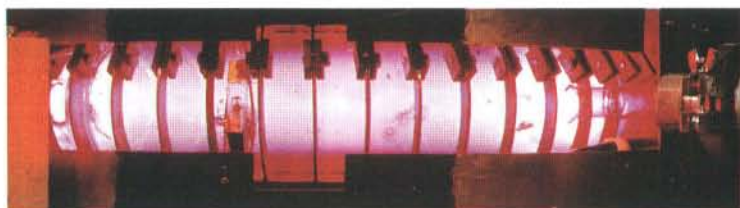


Door het aldus gekweekte tritium terug te voeren in de reactor wordt de cyclus gesloten.

Omdat zowel deuterium- als tritiumkernen een positieve lading bezitten moet de onderlinge elektrostatische afstoting worden overwonnen, wil een fusiereactie optreden. Dit kan indien de kernen elkaar met zo'n hoge snelheid naderen, dat ze binnen het bereik van elkaars aantrekkende kernkrachten komen. De meest efficiënte wijze om de kernen zo'n hoge snelheid te geven is door het deuterium-tritiummengsel te verhitten tot zo'n honderd miljoen Kelvin. Bij deze hoge temperaturen bestaat het mengsel uit een volledig gedissocieerd en geïoniseerd gas van elektronen en positieve kernen, het zogenaamde *plasma*. De kans dat een fusiereactie optreedt, is evenredig met de temperatuur en de dichtheid van het deuterium-

tritiumplasma en met de *energiebehoudtijd*,  $\tau_E$ . De energiebehoudtijd wordt gedefinieerd als de verhouding van de totale energie-inhoud en de totale energie-afvoer per tijdseenheid en geeft een maat voor de kwaliteit van de opsluiting. Zodra het plasma de rand raakt gaat namelijk energie verloren. De waarde van  $\tau_E$  wordt dan ook groter naarmate het plasma beter van de reactorwand vrij blijft. Voor een 'brandende' fusiereactor moet het produkt van dichtheid ( $n$ ), energiebehoudtijd ( $\tau_E$ ) en temperatuur ( $T$ ) de waarde van  $5 \cdot 10^{21}$  keV s.m<sup>-3</sup> overtreffen (zie Intermezzo I). De con-

lovene magnetische opsluitingssysteem is de *tokamak*, een in 1965 door de Russen geïntroduceerde machine (afb. 2). Het plasma zit hierbij opgesloten in een ringvormige kamer, een *torus*, en wordt verhit door een elektrische stroom. Van de transformator die de stroom opwekt, vormt de plasmaring de secundaire wikkeling, terwijl een stelsel van spoelen voor een magneetveld evenwijdig aan de plasmastroom zorgt. De plasmastroom zelf wekt ook een magneetveld op, zodat het voor de opsluiting benodigde veld ontstaat, dat zich als een spiraal rondom de torus wikkelt.



3

dities waaronder fusie plaatsvindt kan men op verschillende manieren verkrijgen. Zo werken er fysici aan *magnetische opsluiting*, aan *traagheidsopsluiting* en aan *lauwe fusie*, een techniek die geenszins lijkt op de door elektrochemici geïntroduceerde *koude kernfusie*.

### Magnetische opsluiting

Het plasma is dankzij de Lorentz-kracht beïnvloedbaar door magnetische velden: deze kracht doet immers geladen deeltjes in schroefvormige banen om magnetische veldlijnen bewegen. De magnetische opsluiting van plasma bij thermonucleaire fusie stoelt op dit principe. Met behulp van magnetische velden wordt het contact van het plasma met de wanden zo goed mogelijk vermeden. Het meest be-

3. In een experiment op Rijnhuizen werd de stabiliteit van plasma bestudeerd. De bovenste foto toont een goed opgesloten plasma, de onderste één in een instabiele toestand.

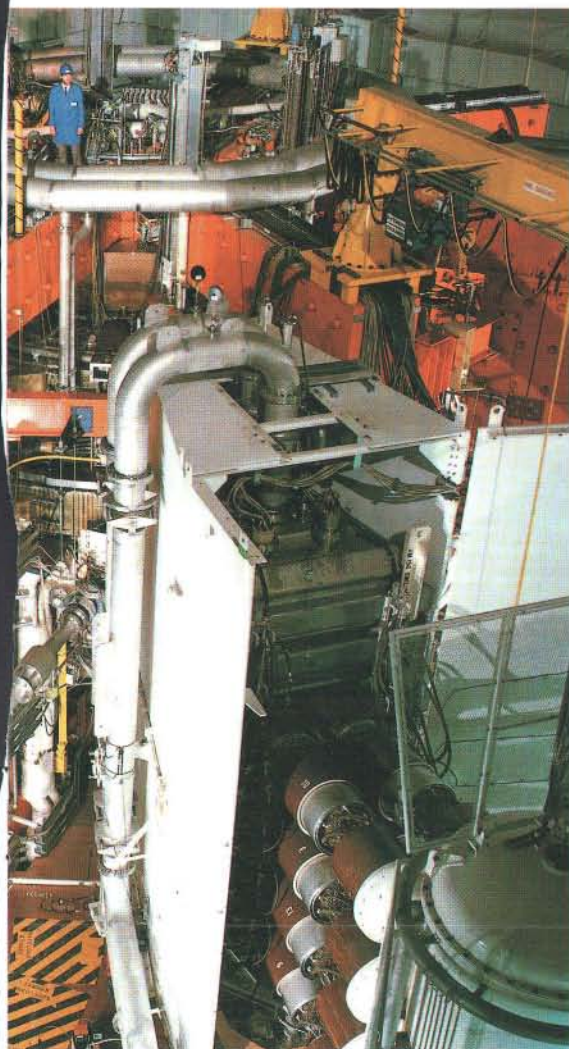
4. In de JET schiet men ter verhitting via de installatie rechtsonder deuteriumatomen met een energie van 80 keV het plasma in.



4



Eenmaal goed vrij van de wand moet het plasma nog een zeer hoge temperatuur bereiken. Een onvermijdelijk nadeel van alle magnetische opsluitingssystemen is echter dat het plasma, naarmate het heter wordt, steeds beter gaat geleiden. Hierdoor kost het enorm veel energie om het plasma via elektrische stroom tot temperaturen boven tien miljoen Kelvin te verhitten, wat leidt tot een onrendabele reactor. Men zoekt daarom naar efficiëntere methoden om het plasma op de temperatuur van honderd miljoen Kelvin te brengen, die nodig is voor ontsteking van het fusieproces.



Eén zo'n verhogingsmethode bestaat uit het bestralen van het plasma met microgolven waarvan de frequentie overeenkomt met de eigenfrequentie van de elektronen of de ionen in het plasma (afb. 5 en 6). Bijgevolg gaan de elektronen of ionen resoneren, waarbij hun energie sterk toeneemt. Deze wordt dan weer afgestaan in botsingen met andere deeltjes, zodat het plasma als geheel een hogere temperatuur krijgt. In een tweede alternatieve verhittingsmethode schiet men bundels deuterium-*atomen* het plasma in. Dit moeten neutrale deeltjes zijn omdat ze anders het plasma niet kunnen binnendringen vanwege het magnetische veld. In het plasma zullen de deuterium-*atomen* door botsingen met plasmadeeltjes geïoniseerd worden en hun energie afstaan, waardoor een temperatuurstijging optreedt. Het plasma in een tokamak is zeer ijl. De dichtheid ligt in de orde van  $10^{19}$  tot  $10^{20}$  deeltjes  $m^{-3}$ , wat overeenkomt met een druk van 0,02 tot 0,2 Pa bij kamertemperatuur. De energiebehoudtijd in de grotere tokamaks schommelt rond de seconde.

### De tokamak-fusioreactor

In de rendabele tokamak-fusioreactor, zoals men zich die voorstelt op grond van de huidige kennis, zal het ringvormige vat met daarin het plasma worden omgeven door een dikke mantel met een koelvloeistof. Het honderd miljoen Kelvin hete deuterium-tritiumplasma zal lang genoeg magnetisch worden opgesloten om fusiereacties te laten plaatsvinden. De hierbij geproduceerde  $\alpha$ -deeltjes ioniseren en verhitten de nieuw toegevoegde brandstof, waardoor de fusiereacties voortduren. De neutronen, die ook bij de fusiereacties vrijkomen, bezitten een kinetische energie van 14,1 MeV en worden, wegens het ontbreken van lading, niet opgesloten door het magneetveld, maar bewegen in rechte banen. De meeste neutronen, die tachtig procent van de energie-opbrengst van de fusiereacties dragen, vliegen dwars door de dunne wand van het ontladingsvat heen en belanden in de dikke mantel met koelvloeistof. Daar zullen de neutronen door botsingen hun energie afstaan en kan de geproduceerde warmte worden benut voor het opwekken van elektriciteit. Het gebruik van lithium als koelvloeistof houdt, zoals we al eerder zagen, de aanvoer van tritium op gang.

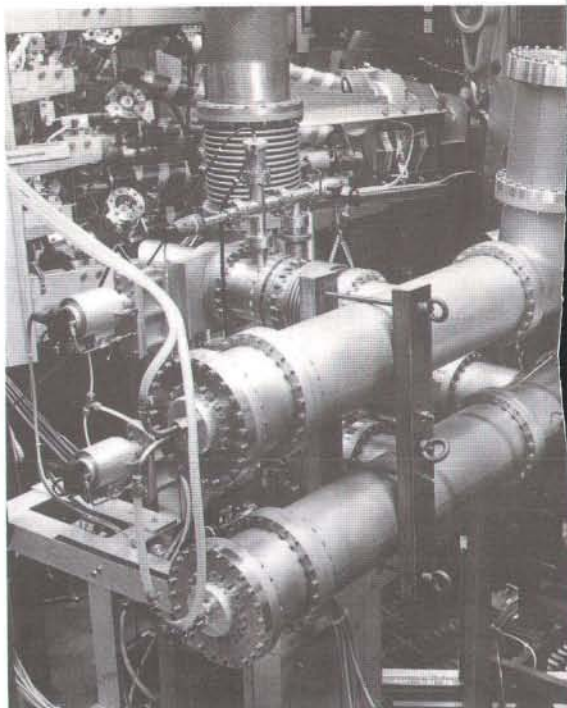


Omdat de plasmastroom in een tokamak wordt aangedreven met een transformator, is het helaas alleen mogelijk om een plasma te formeren en in stand te houden zolang de elektrische stroom door de primaire wikkeling toeneemt. Zodra de primaire stroom afneemt of zodra de transformator verzadigd raakt, neemt de plasmastroom af en daarmee ook een deel van het opsluitende magneetveld. Hierdoor blijft in het algemeen de levensduur van een plasma beperkt tot enkele seconden, tenzij de plasmastroom wordt aangedreven met andere technieken. Dit kan met de al eerder genoemde alternatieve verhittingsmethoden. Onderzoekers van de Japanse Kyushu-universiteit stralen bijvoorbeeld microgolven onder een zodanige hoek de machine in, dat er een netto plasmastroom gaat lopen. Zo slagen ze erin om in hun TRIAM-1M tokamak de levensduur van het plasma van enkele seconden tot tweeënveertig minuten te verlengen.

De meest geavanceerde tokamaks zijn zó groot en zó duur geworden, dat kleine landen het niet kunnen opbrengen om zelf zo'n machine te ontwikkelen. Het thermonucleaire onderzoek kenmerkt zich dan ook door een sterk internationaal karakter. Alle landen van de EEG, Zweden en Zwitserland werken samen aan het grootste fusie-experiment ter wereld: de Joint European Torus (JET). In deze reactor bereikt men bijna de omstandigheden waaronder fusie optreedt: het triple-produkt (zie Intermezzo I) ligt nog slechts een factor tien van reactorcondities af. In de meeste landen staan kleine of middelgrote tokamaks om fundamentele studies aan bijvoorbeeld de stabiliteit van het plasma uit te voeren (afb. 1, 5, 6). Daarnaast dragen Japan, Europa, de VS en de USSR gezamenlijk bij aan de Internationale Thermonucleaire Experimentele Reactor (ITER). Deze machine zal voor de eeuwwisseling in bedrijf komen en voor het eerst de haalbaarheid van energieproductie via het kernfusieproces moeten aantonen. Pas na afloop van het ITER-project kan de eerste demonstratiereactor worden gebouwd.

### Traagheidsopsluiting

Een andere manier om het triple-produkt aan de voorwaarde voor fusie te laten voldoen is door te streven naar een veel hogere dichtheid dan in tokamaks gehaald wordt. In plaats van



5

het ijle deuterium-tritiumplasma bij thermonucleaire fusie, gaat men bij laserfusie daarom uit van een bolletje van bevroren deuterium-tritium-mengsel. Dit bolletje, ter grootte van een zandkorrel, wordt van alle kanten beschoten met zeer krachtige ionen- of laserbundels. De buitenste laag van het bolletje absorbeert de energie van de bundel en verdampt. Het verdampte oppervlaktemateriaal schiet met een enorme snelheid, tussen  $10^5$  en  $10^6$  m.s<sup>-1</sup>, van het bolletje weg (afb. 8). Hierdoor ontstaat een reactiekracht die naar binnen is gericht zodat de kern van het bolletje in elkaar wordt gedrukt. Er vindt als het ware een gecontroleerde micro-implosie plaats, waarbij de dichtheid in het centrum van het bolletje oploopt tot een paar duizend maal de oorspronkelijke dichtheid. Tegelijkertijd stijgt de temperatuur in het bolletje tot thermonucleaire waarden. Zoals gezegd zijn de levensduur en dichtheid van het plasma bij deze methode totaal verschillend van die in de magnetische opsluitsystemen. Men probeert de reactorcondities te bereiken door de dichtheid zeer hoog op te voeren, tot  $n$  ligt tussen  $10^{30}$  en  $10^{31}$  m<sup>-3</sup>. De





6

5 en 6. Een team van het Laboratorium voor Plasmafysica van de Koninklijke Militaire School uit Brussel ontwikkelde apparatuur om het plasma van de Westduitse TEXTOR tokamak op hogere temperaturen te brengen. De hier gemonteerde stralingsantennes (6) zenden microgolven met een frequentie van 32,5 MHz het plasma in. Bij deze frequentie gaan kernen in het plasma resoneren. Om twee verhittingsantennes een vermogen van 2 MW te geven is een ingewikkeld energietoevoer-systeem nodig (5).

duur van de implosie en de daaraan gekoppelde energiebehoudtijd bedraagt ongeveer  $10^{-9}$  seconde.

Er zijn verschillende concepten voor een fusiereactor gebaseerd op deze zogeheten *traagheidsopsluiting*. Wij zullen het principe van het HIGHLIFE-ontwerp van het Lawrence Livermore National Laboratory (VS) beschrijven. Het reactorvat in dit ontwerp is een grote tank waarin vloeibaar lithium langs de wanden naar beneden stroomt. Regelmatig wordt een bolletje ijs van deuterium- en tritiumatomen pneumatisch met hoge snelheid in het reactorvat geschoten. Op het moment dat het bolletje in het centrum van het reactorvat arriveert, wordt het van alle kanten met laserbundels van hoog vermogen bestraald, waardoor het tot ontsteking komt. De 14,1 MeV neutronen zullen hun energie afstaan aan het lithium, dat hierdoor in temperatuur stijgt en, net als in de tokamakreactor, voor een deel splitst in tritium en helium. Het tritium dient ook hier als grondstof voor nieuwe bolletjes.

Laserfusie, ofwel traagheidsopsluiting, staat niet alleen in de belangstelling als een mogelijk-

ke, nieuwe bron van energie, maar ook vanwege de militaire toepassingen ervan. Het imploderende deuterium-tritiumbolletje is immers te beschouwen als een miniatuurwaterstofbom. Detailstudies aan het implosie-proces kunnen leiden tot een effectiever ontwerp van atombommen. Het ontwikkelen van hoogvermogen laser- en deeltjesbundels is in de VS enorm gestimuleerd in het kader van het SDI-project. Daarom zijn grote delen van het werk geheim en staat internationale samenwerking op dit gebied op een laag pitje.

Voorals in Japan, de USSR en de VS wordt veel aandacht besteed aan onderzoek naar traagheidsopsluiting (afb. 7 en 9). Verreweg de grootste laserfusiefaciliteit is de NOVA-reactor van het Lawrence Livermore National Laboratory. Hier worden tien bundels van een neodymium-glaslaser gefocuseerd op een deuterium-tritiumbolletje. De vermogensdichtheid in de bundelpulsen bedraagt ter plaatse van het bolletje ongeveer  $10^{15}$  W.cm<sup>-2</sup>. Het omvangrijkste experiment met ionenbundels voeren onderzoekers van de Sandia National Laboratories in de VS uit. Zij hebben daar zeer recen-



7

telijk een vermogensdichtheid van  $5,4 \cdot 10^{12}$  W.cm<sup>-2</sup> gehaald. Het triple-product in de laserfusie-experimenten ligt nog een factor honderd verwijderd van de benodigde reactor-condities.

Om de reactor commercieel haalbaar te maken, zal men zowel het vermogen van de laser- of deeltjesbundels als de herhalingsfrequentie van de bundelpulsen verder moeten opvoeren. De NOVA-reactor kan maximaal twintig laserpulsen per dag leveren. Dit aantal moet toenemen tot tien per seconde. Het zal duidelijk zijn dat de weg naar een laserfusiereactor nog lang is. De eerstvolgende stap behelst het aantonen dat ontsteking, dat wil zeggen netto-energieproductie plaatsvindt. Daarna kan men gaan bouwen aan de 'Single-Pulse Test Facility' en tot slot beginnen met het werk aan de eerste demonstratiereactor.

### Lauwe fusie dankzij muonen

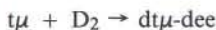
Er bestaat een derde, wezenlijk andere vorm van kernfusie, die echter niet moet worden verward met koude fusie (zie Intermezzo II).

Dit is de zogenaamde *lauwe fusie*. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de katalytische werking van het muon ( $\mu$ ), een deeltje dat net als het elektron (e) een negatieve lading bezit, maar 207 maal zo zwaar is. Muonen kan men creëren door elektronen of lichte atoomkernen met een energie van ongeveer 1 GeV op een stuk materiaal (bijvoorbeeld koper) te schieten. In een 'lauw', maar zeer dicht gasmengsel van tritium- en deuteriumatomen heeft een muon grote kans om een elektron in een van de atomen te vervangen en zo een zogenaamd *muonisch atoom* te vormen ( $d\mu$  of  $t\mu$ ).

Deze energetisch gunstige reactie verloopt vrij snel vanwege het feit dat het muon veel zwaarder is dan het elektron. Doordat een muon met tritium een sterkere binding aangaat dan met deuterium, zal bij botsingen tussen  $d\mu$  en tritium het muon worden uitgewisseld (afb. 10). Vanwege de massa van het muon is de straal van een muonisch tritiumatoom ongeveer 200 maal kleiner dan die van een normaal tritiumatoom. De effectieve reikwijdte van de afstotende Coulombkracht neemt diensgevolge enorm af. Het muonisch tritiumatoom



kan daardoor relatief gemakkelijk een deuteriummolekuul binnendringen onder vorming van een complex molekuul:

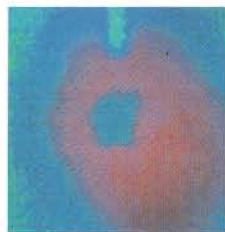


Hoewel het dtm-ion dat deel uitmaakt van het complexe molecuul, veel lijkt op het enkelvoudig geïoniseerde waterstofion  $H_2^+$ , is de afmeting van het ion vanwege het zware muon veel kleiner. De gemiddelde afstand tussen de

twee kernen in het  $\text{dt}\mu$ -ion ligt in de orde van 0,5 pm. Onder deze condities kan kernfusie optreden, hetgeen bij experimenten is waargenomen. De fusie verloopt volgens de reactie:



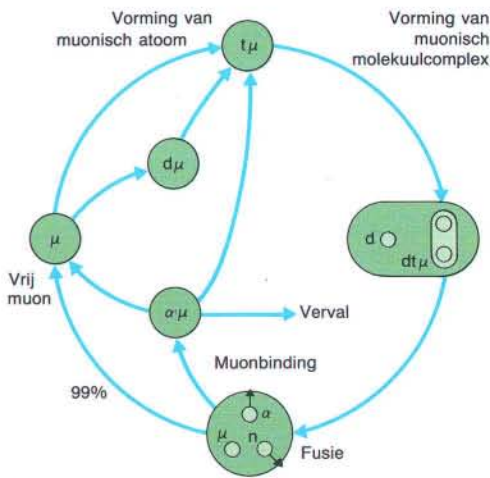
Het  $\alpha$ -deeltje en het neutron kunnen weer worden gebruikt voor energieproductie, terwijl het muon vrijkomt om nieuwe reacties te catalyseren.



8



9



10

7, 8 en 9. In Osaka, Japan, trachten onderzoekers in de GEKKO XII met behulp van laserstralen kernfusie op gang te brengen. Met enorme lasers opgewekte lichtbundels (7) bombarderen deuterium-tritiumbolletjes van alle kanten (9). Aan het oppervlak van de bolletjes verdampt materiaal dat met een enorme

snelheid wegschiet, maar ook een reactiekracht opwekt die zich naar binnen richt. Dit leidt tot een implosie waarbij de kernen van beide isotopen een fusiereactie zouden kunnen aangaan. De afgebeelde röntgenfoto's tonen hoe de warmte zich verdeelt binnen het bolletje gedurende zo'n implosie (8).

10. Tijdens de muongekatalyseerde kernfusie vinden alle atomaire, moleculaire en kernreacties plaats in een tijdsbestek dat veel kleiner is dan de levensduur van een muon, die  $2,2 \cdot 10^{-6}$  s bedraagt. Bij elke reactiecyclus komt 17,6 MeV aan energie vrij. Soms komt een muon dat na de fusie aan het  $\alpha$ -

deeltje is blijven plakken, toch weer vrij om een nieuwe fusiereactie te katalyseren.

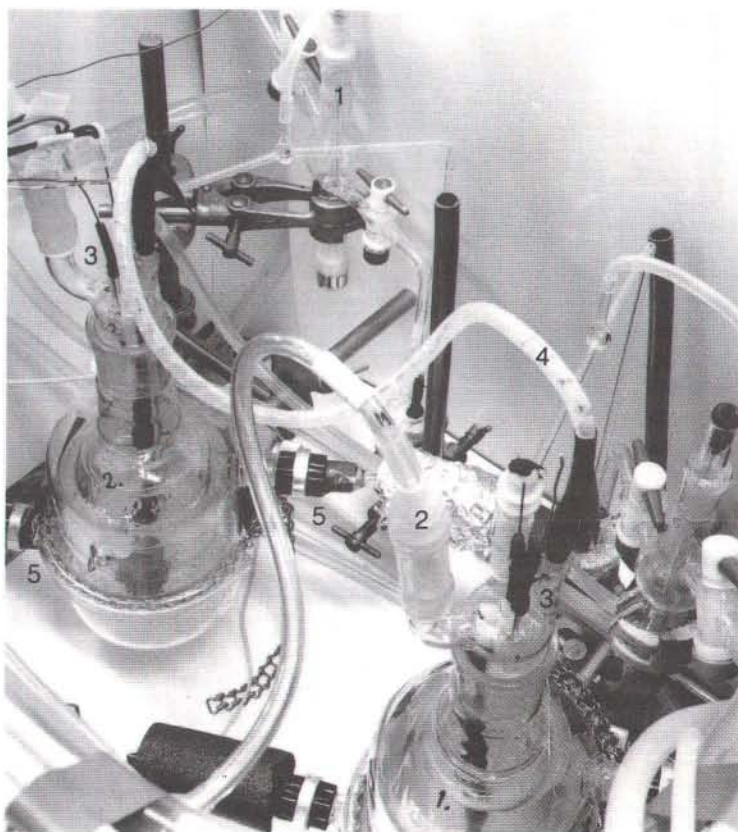
Helaas hebben muonen slechts een levensduur van  $2,2 \mu\text{s}$  en dit is nadelig voor het beschreven fusieproces. De duur van een fusiecyclus wordt op  $0,02 \mu\text{s}$  geschat, zodat één muon ongeveer honderd cycli kan doorlopen alvorens te vervallen. Deze schatting geeft een optimale temperatuur voor de reactiecyclus van ongeveer  $1800 \text{ K}$  – vandaar de naam lauwe fusie. Voorts geldt er een kleine kans van ongeveer één procent dat het muon na de fusie-reactie aan het gevormde  $\alpha$ -deeltje gebonden blijft en dus geen nieuwe reacties meer kan versnellen. Hoewel deze kans erg klein lijkt, bepaalt die toch het aantal fusiecycli dat één muon kan doorlopen.

Nu blijkt dat aantal nog tekort te schieten om de energie terug te verdienen, die nodig is voor de produktie van het muon. In de praktijk hanteert men dit als voorwaarde om een lauwe-fusioreactor 'brandend' te houden. Het produceren van één muon in de huidige deel-

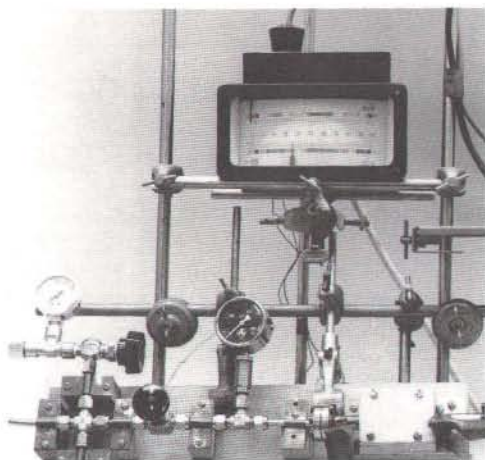
## Koude fusie

Koude fusie kwam begin 1989 uitgebreid in het nieuws nadat de elektro-chemici Fleischmann en Pons wereldkundig maakten dat zij bij hun experimenten een aanzienlijke hoeveelheid energie en neutronen produceerden. Het experiment (afb. 11) betrof een elektrolyse-reactie waarbij een palladium- en een platina-elektrode waren aangebracht in een oplossing van zwaar water ( $\text{D}_2\text{O}$ ) en lithiumdeutroxyde ( $\text{LiOD}$ ). Wanneer een stroom door de vloeistof wordt gestuurd, zal het deuterium in de palladiumkathode migreren. De dichtheid van het deuterium in het palladiumrooster kan hierbij oplopen tot ongeveer  $10^{28} \text{ m}^{-3}$ . Fleischmann en Pons vermoedden dat hierdoor de deuteriumatomen zo dicht bijeen komen te zitten, dat net als bij muon-gekatalseerde fusie de kans op spontane fusiereacties bij lage temperatuur zeer hoog wordt. Ze beweerden een netto-energieproduktie, alsmede een aanzienlijk

11. In samenwerking met elektrochemici en materiaalskundigen probeerden plasmafysici tevergeefs warmte-effecten te registreren, die als gevolg van koude fusie op zouden treden. Hierbij gebruikten ze twee elektrolysecellen, de één voor de elektrolyse van zwaar water (met een mengsel van  $\text{D}_2\text{O}$  en  $\text{LiOD}$  als elektrolyt), de ander voor die van normaal water (met daarin  $\text{H}_2\text{O}$  en  $\text{LiOH}$ ): de controle. Zichtbaar zijn de referentie-elektroden (1), de afvoer van het gevormde knalgas (2), de aansluitdraden van de elektroden (3) en de thermokoppelverbinding tussen de twee cellen (4). Rond de cellen stroomde water waarvan de temperatuur bij in- en uitvoer werd gemeten (5). Een vacuüm gepompte ruimte isoleerde cel plus watermantel van de omgeving.







II-1

aantal fusie-neutronen, te hebben waargenomen. De laatste bewering is inmiddels ingetrokken.

Vele wetenschappers hebben getracht de proeven van Fleischmann en Pons te reproduceren, maar meestal zonder succes. Slechts enkele laboratoria vinden hetzij enige warmteproductie, hetzij neutronen- of gammastraling. Sommige wetenschappers sluiten niet uit dat er mogelijk een tot nu toe onbekend verschijnsel in het palladium plaatsvindt, maar ze zijn er wel van overtuigd dat de energieproductie te laag is voor commercieel aantrekkelijke toepassingen. Maar de vraag rest of we hier überhaupt met fusiereacties te doen hebben.

II-1. Het verhitten en onder hoge druk voorbeladen van palladium met deute-

rium diende om roosterfouten in het metaal te voorkomen.

tjesversnellers kost zo'n 5 tot 10 GeV. Een muon moet daarom minimaal 300 tot 600 reacties katalyseren voor er sprake kan zijn van een netto-energieproductie. Het beste resultaat dat tot nu toe behaald is bij de Los Alamos Muon Factory, bedraagt ongeveer 150 fusies per muon. Het onderzoek aan muon-gekatalyseerde fusie richt zich momenteel op de opvoering van de reactiesnelheid en op de verlaging van de kans dat het muon aan de gevormde  $\alpha$ -deeltjes bindt. Daartoe zoeken de wetenschappers onder andere naar de optimale temperatuur, dichtheid en mengverhouding van het deuterium-tritiummengsel.

Hoewel het onderzoek naar muon-gekatalyseerde fusie eigenlijk nog in de kinderschoenen staat, zijn er al verschillende concepten ontwikkeld voor een lauwe-fusiereactor. De geproduceerde neutronen kunnen een lithium-mantel verhitten en via warmtewisselaars elektriciteit opwekken alsook het benodigde tritium kweken. In een commercieel rendabele reactor reageert een muon 1500 keer en vinden de fusiereacties bij de optimale temperatuur plaats dankzij een zeer efficiënte warmtewisselaar, die nog ontworpen moet worden. Kortom, van muon-gekatalyseerde fusie is nog lang niet duidelijk of het in principe wel commercieel haalbaar is.

#### Literatuur

- Berg A van den. Lauwe fusie. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* 1989; B55: 14, 109-111.  
 Maple J. Plasma's in de JET - Heter en langer opgesloten. *Natuur en Techniek* 1987; 55: 5, 378-393.  
 Nijssen-Vis A, Piekaar HW, Ingen AM van. Fusie-energie bij magnetische opsluiting. *Lesbrief voor VWO*. Voor informatie: FOM-Instituut voor Plasmafysica, tel. 03402 - 31224.  
 Robinson A, Kock LCJM de. Fusie-onderzoek in Europa. *Natuur en Techniek* 1982; 50: 12, 934-953.  
 Sluyters JH, e.a. Een bel van lucht of van energie? *Chemisch Magazine* 1989; december, 722-730.

#### Bronvermelding illustraties

- J.P. Van Devender/Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, VS: 118-119.  
 JET, Culham, GB: 4.  
 Institute of Laser Engineering/Osaka University, Osaka, Japan: 7, 8, 9.  
 De overige illustraties zijn afkomstig van de auteurs met dank aan FOM/Picture Report (1), R. Weynants/KMS, Brussel (5, 6), P. Froelich, Uppsala (10) en Wim van Zanten (II-1, 11).



# ZWEMMEN OF ZINKEN

## Voortbeweging onder water

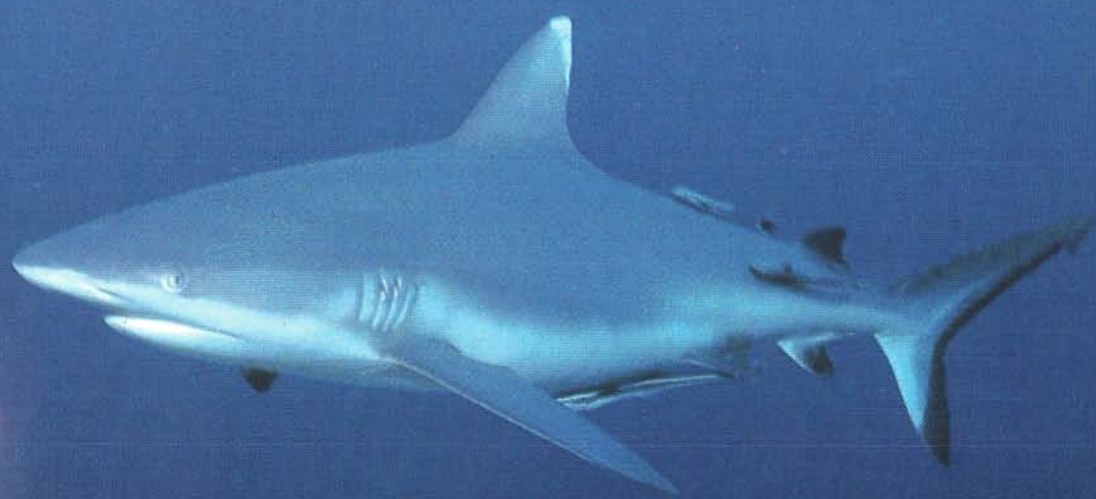
Onze planeet heeft een verkeerde naam. In plaats van Aarde zou ze Water moeten heten, want het overgrote deel van haar oppervlak is met die vloeistof bedekt. Het leven begon in het water en zelfs nu, na enkele miljarden jaren evolutie, is een enorm aantal soorten uitsluitend daar te vinden. Die organismen moeten goed aangepast zijn aan de fysische omstandigheden van het medium water: zo moeten ze uitstekend kunnen drijven en zwemmen. Welke wetmatigheden spelen daarbij een rol?

**J.J. Videler**

*Vakgroep Mariene Biologie  
Rijksuniversiteit Groningen*

We kunnen waterorganismen – of dat nu bacteriën, planten of dieren zijn – onderverdelen in twee groepen. Het plankton is klein en kan zich nauwelijks ten opzichte van het omringende water verplaatsen. Het roeipootkreeftje in de inzet is er een tegenwoordiger van. Het nekton daarentegen, waartoe de haai behoort, kan zich goed door het water verplaatsen.





Om in water te kunnen voortbewegen spelen de fysische eigenschappen van water zoals *viscositeit* (strokerigheid) en *dichtheid* een belangrijke rol. Voor kleine wezens, die langzaam bewegen en dus hoofdzakelijk drijven, is de strokerigheid van water van overheersend belang; daarentegen zullen grote, snelzwemmende dieren vooral de dichtheid (traagheid) benutten om zich voort te stuwten.

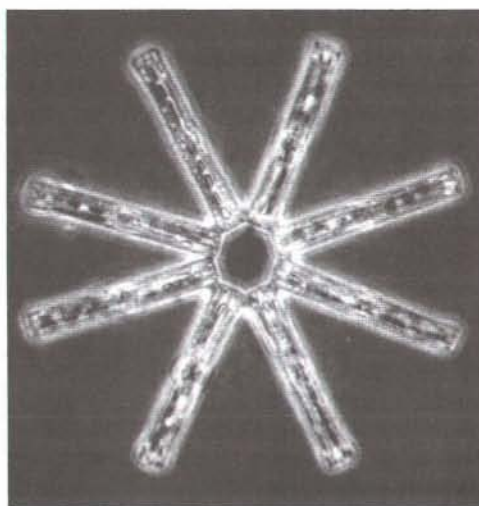
Het *getal van Reynolds* (Re) laat zien dat strokerigheid en dichtheid een tegengesteld effect hebben:

$$Re = L U \rho \cdot \eta^{-1} \quad (1)$$

Daarbij is L de lengte van het organisme (in m) en U de snelheid van voortbeweging (in  $m \cdot s^{-1}$ ); verder is  $\rho \cdot \eta^{-1}$  (uit te spreken als: 'rho' en 'eta') de verhouding tussen de dichtheid (in  $kg \cdot m^{-3}$ ) en de viscositeit ( $Ns \cdot m^{-2} = Pa \cdot s$ ) van het water. Bij dieren varieert het Reynoldsgetal van kleiner dan 1 voor protozoa tot  $10^8$  voor de grootste walvis, de blauwe vinvis (zie afb. 4 en tabel 1).

### Drijvers en zwemmers

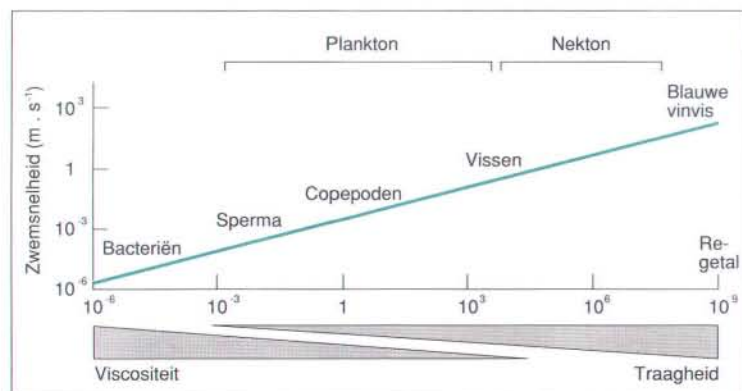
Organismen met een laag Re-getal kunnen zich ten opzichte van de heersende waterstromingen nauwelijks verplaatsen. Deze groep organismen wordt *plankton* genoemd. Hiertoe behoren algen (fytoplankton) en kleine dieren (zoöplankton). Het fytoplankton is voor de fotosynthese afhankelijk van het licht dat vanaf het oppervlak tot maximaal enkele honderden meters diepte doordringt. Roeipootkreeftjes (copepoden) uit het zoöplankton, bewegen dagelijks honderden meters op en neer:



1

's nachts 'grazen' ze temidden van de algen in de bovenste waterlagen en overdag verstoppert ze zich in donkere diepten.

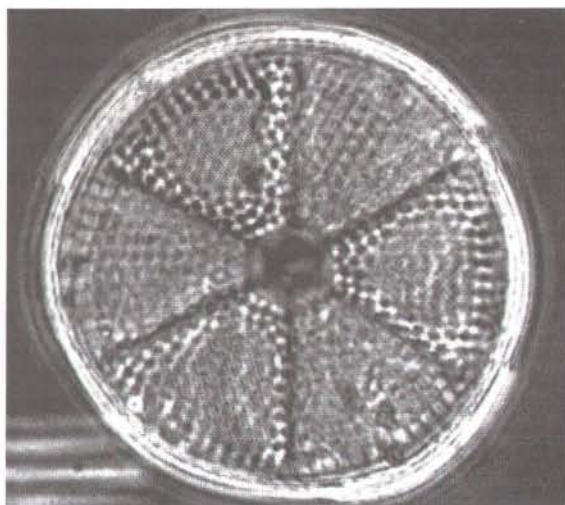
Grote, krachtige zwemmers zoals vissen, walvissen, dolfijnen en pijlintvissen bereiken hoge Reynoldsgetallen. Ze worden als *nekton* aangeduid. Nekton verplaatst zich onafhankelijk van de heersende stromingen en kan goed zwemmen. De meeste vissen zwemmen door het lichaam golvend heen en weer te bewegen; door een golvende beweging naar achteren beweegt het lichaam zich naar voren. De golvende bewegingen stuwten de vis in interactie met het water voort. Voor langzaam en voor snel zwemmen zijn er aparte spieren. De snelste



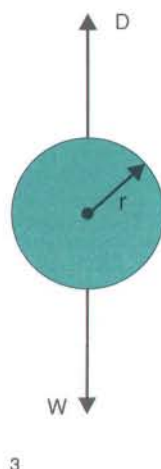
4

4. Grote waterorganismen kunnen een grotere zwemsnelheid ontwikkelen dan kleine. Ze hebben dan ook een groter Re-getal. Kleine dieren ondervinden bij de voortbeweging veel hinder van de viscositeit van het water. Die hinder neemt voor grotere dieren af terwijl ze kunnen profiteren van de traagheid om zich af te zetten.





2



1, 2 en 3. Een bolletje (3) met een straal  $r$  zinkt als het gewicht  $W$  groter is dan de verplaatste hoeveelheid water. Het ondervindt daarbij een wrijving  $D$ . Een bolvormige alg komt goed met dit model overeen. Uitsteeksels, of een stekelige kolonievorm (1) vergroten het organisme zonder dat de zinksnelheid sterk toeneemt.

zwemmers gebruiken die spieren om een sikkelvormige staart snel heen en weer te bewegen. De zwaardvis is zo'n vis die zich heeft gespecialiseerd in het ontwikkelen van extreem hoge snelheden.

### Zinksnelheid van plankton

Het plankton bestaat uit eencellige algen, planteneters die van de algen leven en wat grotere vleeseters die van de planteneters en van elkaar leven. Algen maken door middel van fotosynthese organische stoffen. Alle dieren in de voedselketen zijn direct of indirect afhankelijk van deze voedselbron.

Licht is tot de bovenste waterlagen beperkt en dus is het voor al deze organismen belangrijk om niet weg te zinken in de diepte. Ze moeten daarom over voldoende drijfvermogen beschikken. De geringe afmetingen, die kenmerkend zijn voor een groot deel van het plankton, hebben daar mogelijk mee te maken.

Om het *drijfvermogen* van een planktont te kunnen analyseren, gebruiken we het model van een bolletje met een straal  $r$  en een gewicht onder water  $W$  (afb. 3). Voor het gewicht onder water geldt:

$$W = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_a - \rho_w) g \text{ [N]} \quad (2)$$

De factor tussen haakjes is het verschil tussen de dichtheid van het organisme ( $\rho_a$ ) en die van

TABEL 1. Reynoldsgetallen van enkele waterdieren

		Lengte (m)	Snelheid (m.s <sup>-1</sup> )	Re-getal
Blauwe vinvis		30	10	3.10 <sup>8</sup>
Tonijn		3	10	3.10 <sup>7</sup>
Mens		1,8	1,7	3.10 <sup>6</sup>
Makreel		0,3	3,3	1.10 <sup>6</sup>
Haring	adult	0,2	1	2.10 <sup>5</sup>
	larve	0,1	0,5	5.10 <sup>4</sup>
		0,04	0,16	6.10 <sup>3</sup>
		0,02	0,06	1.10 <sup>3</sup>
Copepoden		0,001	0,002	2
Zeeëgelsperma		0,00015	0,0002	3.10 <sup>-2</sup>

TABEL 2. Dikte/lengte-verhouding van gestroomlijnde lichamen

	D.L <sup>-1</sup>
Optimaal gestroomlijnd lichaam	0,22
Paling	0,05
Makreel	0,14
Kabeljauw	0,16
Blauwe vinvis	0,21
Dolfijn	0,25
Tonijn	0,28



5

water ( $\rho_w$ ),  $g$  is de versnelling van de zwaartekracht en het eerste deel van de formule is het volume van het bolletje. Het zinkende bolletje zal een weerstand  $D_l$  ondervinden in een richting tegengesteld aan die van de kracht  $W$ . Voor  $Re$ -getallen kleiner dan 1 voorspelt de wet van Stokes dat:

$$D_l = 6 \pi r U_z \eta \text{ [N]} \quad (3)$$

Waarbij  $U_z$  de zinksnelheid is, die eenparig wordt wanneer  $D_l$  en  $W$  aan elkaar gelijk zijn. Door (2) en (3) aan elkaar gelijk te stellen vinden we een formule voor de zinksnelheid:

$$U_z = 2/9 r^2 g (\rho_a - \rho_w) \eta^{-1} \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (4)$$

Het is nu meteen duidelijk dat 'groot zijn' de zinksnelheid sterk opvoert, want in de formule staat de straal in het kwadraat; voor 'klein zijn' geldt dus het omgekeerde.

Door lichte bouwstoffen te benutten kan een organisme zijn eigen dichtheid meer in de richting brengen van de dichtheid van water. Zo kunnen plankton-algen zware ionen in hun cel vervangen door lichtere (bijvoorbeeld  $Na^+$  in plaats van  $K^+$ ), of ze gebruiken ingesloten olie- of vetdruppels en ook wel water, als vulmiddel om het drijfvermogen te vergroten. Kwallen bestaan voor 99% uit water, het overige plankton voor gemiddeld 90%.

In afwijking van het model dat we tot nu toe gebruikt hebben, is plankton meestal niet bolvormig maar juist nogal stekelig gebouwd. Doordat er tussen de stekels water zit, worden zo de afmetingen groter zonder dat de dicht-

heid ten opzichte van water noemenswaardig toeneemt. De stekeligheid vermindert bovendien de aantrekkelijkheid als prooi en vergroot de zinkweerstand.

### Nekton

Snelle zwimmers hebben gestroomlijnde lichamen: ze zijn spoelvormig gebouwd, aan de voorkant afgerond en van achteren puntig toelopend. De grootste dikte zit op ongeveer een derde van de lichaamslengte. Het grote verschil tussen de lichaamsvormen van plankton en nekton houdt direct verband met het feit dat ze zich in water bevinden. Nekton opereert bij  $Re$ -getallen die veel groter zijn dan 1 en dan is de weerstand  $D_h$  niet evenredig met de viscositeit maar met de dichtheid van het water, en ook niet met de snelheid  $U$  als zodanig, maar met de snelheid in het kwadraat:

$$D_h = 1/2 \rho A_w U^2 C_d \text{ [N]} \quad (5)$$

In deze formule is  $A_w$  het oppervlak van het dier en  $C_d$  een weerstandscoefficiënt die afhangt van de vorm van het dier en van de manier waarop de stroming rond het zwemmende dier verloopt.

Een nektont die zijn snelheid wil verdubbelen moet ongeveer vier maal meer weerstand overwinnen; daarvoor is wel acht maal meer energie nodig, want die is evenredig met de weerstand maal de snelheid — dus met de derde macht van  $U$ .



De weerstandscoefficiënt van een gestroomlijnd lichaam wordt voor een groot deel bepaald door de verhouding tussen lengte en dikte. Een extreem dun, naaldvormig lichaam zou een erg lage weerstand kunnen hebben, maar om al hun functies te kunnen vervullen moeten dierlijke lichamen nu eenmaal een bepaald volume hebben. De meest optimale oplossing is de vorm die bij het grootste volume de laagste weerstand geeft. Experimenten in stromingskanalen hebben aangetoond dat die optimale vorm wordt benaderd indien de verhouding tussen dikte en lengte ongeveer 0,22 is. De lichaamsvorm van een aantal dieren blijkt dit optimum dicht te naderen (zie tabel 2). De paling daarentegen heeft een zeer slechte stroomlijn en is dus niet gebouwd om snel en met weinig weerstand te kunnen zwemmen.

### Het hydrostatisch evenwicht

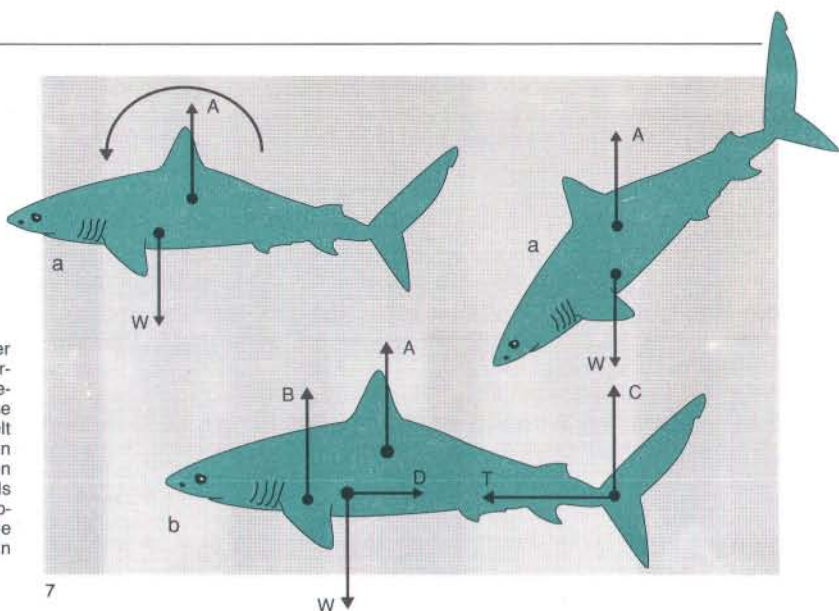
Wat gebeurt er wanneer een nektont zich bewegingsloos in het water bevindt? Als voorbeeld nemen we een haai in rust (afb. 7a). De haai bevindt zich in een onstabiele situatie, want zijn *opdrijfpunt* en zijn *zwaartepunt* liggen op verschillende plaatsen in het lichaam. De resultante van alle naar boven gerichte krachten ( $A$ ) die volgens de wet van Archimedes ontstaan, grijpen aan in het opdrijfpunt. Het gewicht ( $W$ ) van de haai – gelijk aan de massa maal de versnelling van de zwaartekracht – werkt in het zwaartepunt naar beneden. Deze twee krachten zullen het lichaam net zo lang kantelen tot beide punten precies boven elkaar liggen. In die schuine houding kan het dier moeiteloos zweven. Of het dan om-



5. Tot het nektont rekenen we alle waterorganismen die zich actief door het water kunnen voortbewegen. Dat zijn niet alleen vissen; ook deze pijlintkvis is een uitstekende zwemer.

6. De potvis is een walvis, een zoogdier dus, en behoort letterlijk tot de groten der aarde. De enorme kop van het 15 m lange dier is gevuld met spermaceti-olie. Door de dichtheid ervan te verhogen kan de potvis zijn soortelijk gewicht opvoeren. Een potvis kan gemakkelijk honderden meters diep duiken.

7. Op een nektont, hier een haai, in rust (a) werken twee krachten: het gewicht  $W$  en de opwaartse kracht  $A$ . Het dier kantelt totdat de punten waarin beide krachten aangrijpen boven elkaar liggen. Als de staart stuwkracht  $T$  opwekt, ontstaan verticale krachten die de haai in evenwicht houden.



hoog of omlaag zweeft hangt af van de dichtheid van het dier t.o.v. die van water.

Om hun drijfvermogen te vergroten bezitten vissen een met gas gevulde zwemblaas en is de lever van een haai met olie gevuld. De grootste tandwalvis, de potvis, bezit een speciale aanpassing om voor zijn voedsel meer dan duizend meter diep te kunnen duiken. Hij regelt namelijk op een bepaalde manier de op- en neerwaartse krachten op elke diepte. De grote bult op zijn hoofd is gevuld met spermaceti-olie, die de eigenschap heeft lichter te zijn bij hogere temperaturen en zwaarder wanneer het koud is. Dit grote zoogdier koelt zijn olie met water om te kunnen zinken, maar om het drijfvermogen voor de opstijging te vergroten wordt het spermaceti-orgaan weer verwarmd door een verhoogde doorstroming met bloed.

### De krachten op een zwemmende vis

Een nektont – bijvoorbeeld een haai (afb. 7b) – die zich horizontaal door het water beweegt, heeft met andere factoren te maken. Er werken dan namelijk horizontale krachten in de lengterichting: het zijn de stuwkracht  $T$  en de weerstand  $D$ . Beide krachten werken langs een horizontale lijn die door het zwaartepunt gaat. Stuwkracht wordt opgewekt door heen en weer gaande bewegingen van het staartgedeelte. Doordat de staart van een haai aan de rugzijde anders is gevormd dan aan de buikzij-

### Hoe ontstaat stuwkracht?

De kop van een vis dringt binnen in stilstaand water en het golvende lichaam duwt water opzij en naar achteren, waardoor draaikolken ontstaan. De traagheid van het water verzet zich tegen deze verstoring en reactiekrachten stuwden de vis voort. De interactie tussen vis en water stopt op het moment dat de staart voorbij is en er niet méér verstoring wordt toegevoegd. Rond de staartvin is het eindresultaat van de totale verstoring te zien en daarom bestuderen we de interactie daar in detail.

Afbeelding I-1a toont twee omtrekken van een zwemmende kabeljauw in een horizontaal vlak. De  $x$ -as valt samen met de zwemrichting. De hoek  $\theta$  (theta) tussen de staart en de  $x$ -as verandert voortdurend. Twee opeenvolgende staartposities zijn in afbeelding I-1b vergroot getekend. De tijd die tussen die twee posities verlopen is, is bekend en we kunnen de afgelegde afstand van de staartpunt meten. Die verplaatsing is het gevolg van de voorwaartse snelheid  $U$  van de vis en de snelheid  $V$  van de krommingsgolf in tegengestelde richting (zie de snelheidsvectoren  $V$  en  $U$  in afb. I-1b). De onderbroken pijl is de snelheidsvector van de staartpunt, die wordt ontbonden in een vector  $W$  loodrecht op het oppervlak van de vin en een vector  $K$  langs de vin. We nemen aan dat de vinbeweging in de richting  $K$  het water nauwelijks beroert. Vector  $W$  echter zal zijn snelheid meegeven aan al het water dat passeert door een cirkel rond het einde van de staartvin. Afbeelding I-1c laat een lengte-eenheid van deze zogenaamde



de, ontstaat er ten gevolge van de stuwende beweging ook een naar boven gerichte kracht C en een zijwaartse kracht. De borstvinnen van de haai maken een kleine hoek met het horizontale vlak en veroorzaken zo een opwaartse kracht B. De krachten B en C, plus de opwaartse kracht A grijpen niet aan in het zwaartepunt; daardoor veroorzaken ze draaimomenten ten opzichte van het zwaartepunt.

Wanneer een haai met eenparige snelheid in *dynamisch evenwicht* zwemt, moeten de tegen-gestelde horizontale krachten aan elkaar gelijk zijn ( $T = D$ ). Verder moeten de opwaartse en neerwaartse krachten elkaar opheffen ( $A + B + C = W$ ) en tenslotte moet gelden:  $Aa + Bb = Cc$ , waarbij a, b en c de kortste afstanden zijn tussen de vectoren van de krachten A, B en C en die van W.

## Dynamica van zwemmende vissen

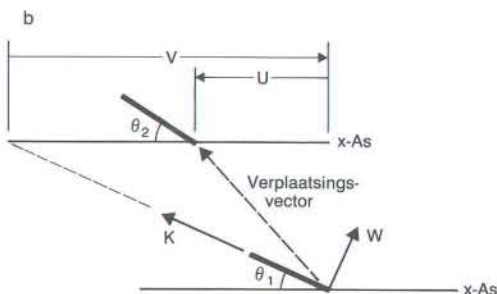
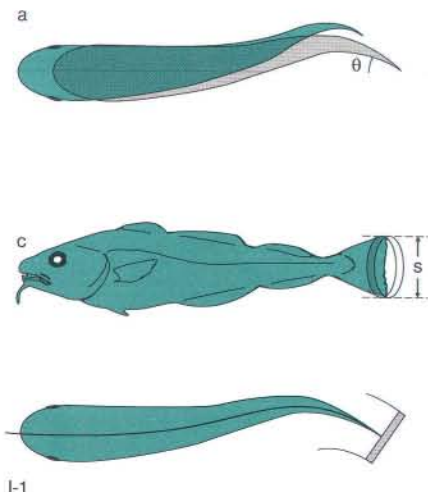
De interacties tussen een zwemmende vis en het water zijn zeer gecompliceerd en nog niet ten volle doorgrond. We zullen ons beperken tot het zwemmen met een eenparige voortgaande beweging. In de natuur zwemmen vissen vrijwel nooit op die manier. Om ze toch met constante snelheid langs een rechte lijn te laten zwemmen hebben we vissen in een 14 m lang aquarium getraind om tussen twee voerplaatsen heen en weer te zwemmen. Midden boven het aquarium werden met een high-speed-filmcamera opnamen van de passerende vissen gemaakt. Deze films werden vervolgens beeld voor beeld geanalyseerd.

Afbeelding 12 geeft als voorbeeld de analyse van de zwembewegingen van een 42 cm lange

## INTERMEZZO

virtuele massa water van opzij en van boven zien. Het oppervlak van de cirkel is  $\frac{1}{4} \pi s^2$  ( $m^2$ ), waarin s de hoogte van de staart is. De virtuele massa water M per lengte-eenheid wordt geschat op  $\frac{1}{4} \pi s^2 \rho$  ( $kg \cdot m^{-1}$ ) ( $\rho$  is de dichtheid van het water). De staart slipt met  $K \cdot m \cdot s^{-1}$  door de cirkel en per seconde wordt er dus  $K M$  kg water in beweging gebracht. De kracht die de vis in de richting W op het water uitoefent is dan  $W K M$  Newton. Een deel van deze

kracht brengt het water in beweging en draagt niet bij aan de voortstuwing van de vis. De rest roept een reactiekracht op die op de staart aangrijpt in een richting tegengesteld aan W. De ontbondene van deze kracht in de x-richting stuwt de vis voort. Dit is een sterk vereenvoudigd beeld van het ontstaan van stuwkracht waarbij het goed is te beseffen dat in werkelijkheid de hele vis in interactie met het water is en niet alleen de staart.



I-1. Een vis ontleent zijn stuwkracht voornamelijk aan de waterverplaatsing

door zijn staart. Zie voor verdere uitleg de tekst van het intermezzo.

kabeljauw die met een eenparige snelheid  $U$  van  $0,7 \text{ m.s}^{-1}$  zwemt. De filmsnelheid was tweehonderd beelden per seconde en de omtrek van de vis op elk beeld werd gedigitaliseerd ingevoerd in een computer. Een aantal omtrekken tijdens een staartslag van links naar rechts is in de afbeelding getekend. De omtrekken zijn naast elkaar afgebeeld en de tijdsafstand tussen twee beelden is twee honderdste seconde. De punten behoren bij de niet-bewegende ondergrond.

Computeranalyse van de middellijnen van de beelden laat zien dat er een krommingsgolf van kop naar staart loopt. De punten op het lichaam die het sterkst gekromd zijn vormen de toppen van die golf. Elke grijze schuine lijn in afbeelding 12 verbindt de plaatsen met elkaar waar een bepaalde golftop zich achtereenvol-

gens op het lichaam bevindt. Deze lijn laat zien dat de golf van kop naar staart loopt. De snelheid  $V$  waarmee de golf naar achteren loopt is  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$  en dus groter dan de snelheid  $U$  van de vis. Het verschil tussen beide snelheden geeft een indruk van de efficiëntie van de voortstuwende beweging. De verticale afstand tussen twee schuine lijnen is de halve golflengte ( $\lambda_b$ ) van de krommingsgolf; de horizontale afstand is evenredig met de halve golfperiode  $T$ . De afstand die de kabeljauw heeft afgelegd tijdens die halve periode met een halve staartslag is  $\frac{1}{2}UT$ . De amplitude van de zijdelingse beweging is niet van kop tot staart even groot. Juist achter de kop is de uitwijking het kleinste, ongeveer één procent van de lichaamslengte. Ze is het grootst bij de staartpunt: tien procent van de lichaamslengte.



8



9



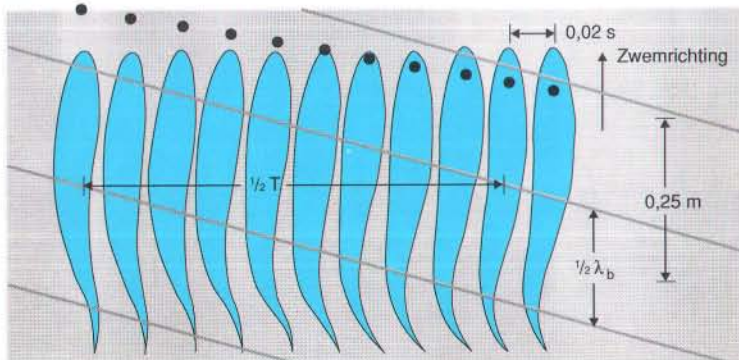
10

8, 9 en 10. Aan de hand van deze beelden kunnen de zwembewegingen van een vis geanalyseerd worden. De kabeljauw is met tussenpozen van 0,12 s gefotografeerd.

11. Zalmen zijn zeer krachtige zwimmers. Dat moet ook wel, want op hun trektocht naar de paaiplaatsen in de bovenloop van een rivier, doemen heel wat hindernissen op.



11



12



13. Een dolfijn op topsnelheid. Het dier benut voor zijn voortbeweging de traagheid van het water op dezelfde manier als een vis dat doet.



13

Om grote en kleine vissen met elkaar te kunnen vergelijken is het zinvol de lichaamslengte als eenheid te kiezen. De krommingsgolf heeft een bepaalde tijd nodig om van kop tot staart over het lichaam te lopen. Als eenheid van die tijd kunnen we de golfperiode gebruiken. Dan zal blijken dat bij de kabeljauw de golf er één periode over doet. De krommingsgolf bij een paling doet er ongeveer anderhalve periode over om de lichaamslengte te doorlopen.

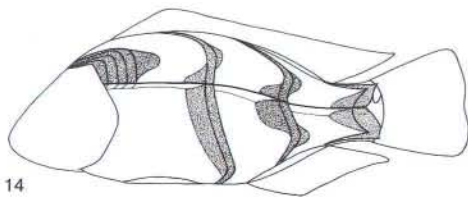
#### Een witte en een rode motor

Er is een groot verschil tussen bouw en werking van de voortbewegingspijlen van vissen en die van andere gewervelde dieren. Het lichaam van een vis wordt door een verticaal *septum* tussen kop en staart in een linker- en

een rechterhelft verdeeld. Dit septum wordt verstevigd door de wervelkolom, die in de lengterichting onsamendrukbaar is, maar wel verend kan buigen. De spieren zijn vervuld met zwaarste deel van de vis. De spiervezels zijn kort en verpakt in ingewikkeld gevormde pakketten die *myotomen* worden genoemd. Deze myotomen liggen, gescheiden door *myosepten*, achter elkaar; ze worden omgeven door een stevige huid, die voor het grootste deel bestaat uit lagen onrekbare vezels. De vezelrichtingen in die lagen kruisen elkaar. De spiercellen in de myotomen liggen ongeveer in de lengterichting van de vis. Meestal zijn er twee typen spiercellen: rode en witte. De rode cellen vormen een dun laagje aan de buitenkant van de myotomen direct onder de huid, de witte vullen de rest.

De elektrische activiteit van de spieren kan tijdens het zwemmen zichtbaar worden gemaakt met behulp van myografische technieken. Daarmee werd aangetoond dat tijdens het zwemmen met snelheden die lager zijn dan de maximale kruissnelheid – ongeveer drie lichaamslengten per seconde – alleen de rode spiercellen actief zijn. De witte vezels worden pas actief bij hogere snelheden. Rode spiercellen zijn vrijwel onvermoeibaar terwijl de witte vaak na enkele seconden al uitgeput zijn.

In ons eigen lichaam zitten spieren die voor de voortbeweging dienen zodanig aan het skelet vast dat er een gewricht zit tussen de aan-



14

12. Analyse van de zwembewegingen van een kabeljauw. De vis zwemt met een snelheid  $V$  van  $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ , de golfsnelheid  $U$  is  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$ .

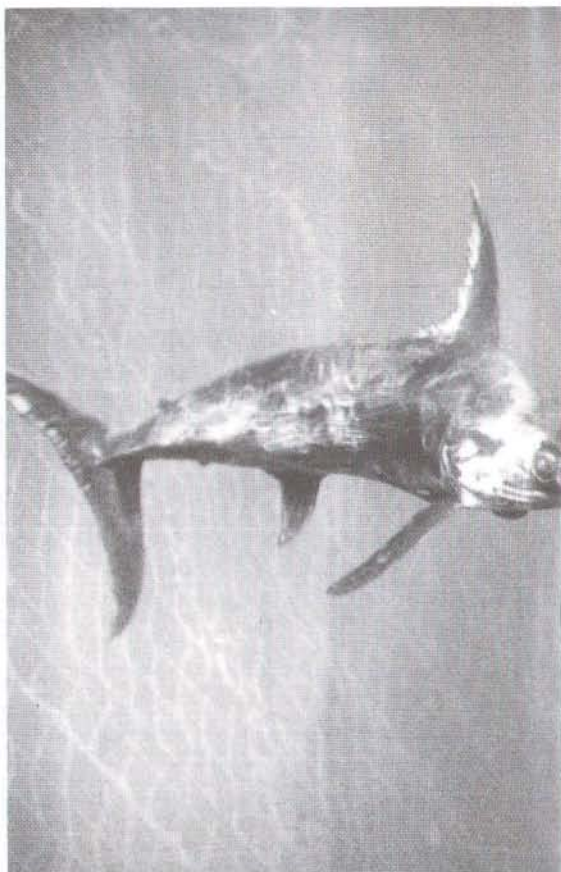
14. Vissen zijn, op kop en ingewanden na, helemaal volgepakt met myotomen. Hier zijn enkele van die ingewikkeld gevormde spierpakketten te zien.

hechtingspunten. Ze wekken kracht op door die aanhechtingspunten tegen een bepaalde belasting in naar elkaar toe te brengen. De lengtespieren van vissen hebben geen duidelijke aanhechtingspunten: ze zitten niet met hun uiteinden aan het skelet vast maar vullen de ruimte tussen de huid en het verticale septum op. Spieren hebben een constant volume: dat houdt in dat ze bij verkorten ook dikker worden. De vissen gebruiken dat dikker worden nu juist om kracht op te wekken. Wanneer de spieren zich aan één zijde samentrekken, zwellen ze op en drukken ze de strakke huid naar buiten. De hoek tussen de kruisende vezels in de huid verandert daardoor zo, dat de huid in verticale richting wordt opgerekt. Die ruimte moet natuurlijk uit de lengte komen en daardoor wordt de huid in die richting korter zodat het visselichaam zich kromt. De spieren moeten dan wel vrijwel op hetzelfde moment van kop tot staart actief zijn. Bij snelle vissen zijn ze dat ook.

Hoe komt dan de krommingsgolf, die in één periode van kop tot staart over het lichaam loopt, tot stand? Die ontstaat doordat de interactie tussen de verschillende delen van het visselichaam en het water niet op elke plaats hetzelfde is. De platte staart ondervindt veel meer weerstand van het water dan de voorkant van het lichaam, die op doorsnede rond is. In de lucht – bijvoorbeeld spartelend aan een hengel – buigt een vis zijn lichaam afwisselend naar links en naar rechts in een C-vorm.

### Zwemprestaties en extreme aanpassingen

De afstand die een vis per staartslag aflegt wordt de *paslengte* genoemd (bij de kabeljauw in afbeelding 12 was die  $UT = 0,25 \text{ m} = 0,6$  lichaamslengten). De paslengte bij de verschillende soorten varieert nogal. De paling is een slechte zwemmer die iets meer dan een halve lichaamslengte per staartslag haalt, makrelen leggen per staartslag wel een hele lichaamslengte af. Bij de tot nu toe onderzochte vissen blijkt de paslengte vrijwel onafhankelijk te zijn van de zwemsnelheid. De snelheid is dus het produkt van paslengte en slagfrequentie. Als we paslengte en hoogste staartslagfrequentie kennen, kunnen we de maximale snelheid die een vis kan bereiken schatten. Die hangt af van de minimale contractietijd of de maximale contractiesnelheid van de spieren.



15

15. Deze duiker is er niet zeker van dat het zwaard van een zwaardvis te zwak is om als wapen te dienen.

De *contractiesnelheid* blijkt afhankelijk te zijn van de temperatuur en de lengte van de vis. Bij hogere temperaturen is de contractietijd korter en zwemmen de vissen harder (een makreel kan bij  $15^\circ\text{C}$  twee maal zo hard zwemmen als bij  $5^\circ\text{C}$ ). Bij  $10^\circ\text{C}$  heeft een kabeljauw van 80 cm een minimale spiercontractietijd van ca  $0,06 \text{ s}$ , één van 40 cm heeft slechts  $0,04 \text{ s}$  nodig voor een volledige contractie. De maximale staartslagfrequenties van deze dieren zijn daardoor respectievelijk 8,3 en 12,5 Hz. De paslengte is voor alle kabeljauwen ongeveer 0,6 lichaamslengten. De grote kabeljauw zwemt dus maximaal ongeveer vijf lichaamslengten per seconde en de kleine 7,5 lichaamslengten per seconde.





De hoogste snelheden van de zwaardvis zijn nooit gemeten maar moeten ver boven de  $100 \text{ km.h}^{-1}$  liggen. Drie meter lange dieren halen gemakkelijk 10 lichaamslengten per seconde en zwemmen dan al  $108 \text{ km.h}^{-1}$ . Het Re-getal voor het hele lichaam nadert  $10^8$ . Het is evenredig met de lengte vanaf het voorste puntje van de kop en neemt dus van voor naar achter langs het lichaam toe. Als het onderweg een waarde bereikt tussen  $10^6$  en  $10^7$  gaat de stroming over van *laminair* naar *turbulent*. Dat heeft meestal een sterke vergroting van de weerstand tot gevolg. Nog meer weerstand ontstaat wanneer massa's water kolkend van het lichaam loslaten. Dat gebeurt vooral wanneer het langsstromende water plotseling van richting moet veranderen.

De zwaardvis vertoont aanpassingen in lichaamsbouw die er kennelijk toe dienen deze

negatieve effecten tijdens snel zwemmen te voorkomen. Het meest opvallende is het zwaard. Het is een plat uitgroeijsel van de bovenkaak dat te zwak gebouwd is om als wapen te kunnen dienen. Het is horizontaal afgeplat en de zijanten zijn vrij scherp. Het oppervlak is ruw als grof schuurpapier en wekt kleine wervelingen op. Microturbulentie verkleint de weerstandstoename bij de overgang van *laminair* naar *turbulent* en voorkomt het afbreken van watermassa's. Afbreken gebeurt ook op plaatsen waar een plotselinge dikteverandering in de stromingsrichting optreedt, zoals bij de kop. Om dit te voorkomen heeft de zwaardvis een hol voorhoofd. De rug- en borstvinnen staan vlak achter het dikste deel op het lichaam ingeplant, precies daar waar het gevaar voor afbreken van de stroming laag is. De staartwortel is sterk horizontaal afgeplat waardoor hij bij het heen en weer slaan een minimale weerstand van het water ondervindt. De hoge staartvin stuwt de vis voort. Harde randen op de staartwortel richten het water op het midden van de staartvin zodat die over de hele hoogte optimaal kan stuwten.

Al deze voorbeelden laten zien dat het water een uitdagend milieu vormt waaraan waterorganismen zich op allerlei manieren hebben aangepast. De fysische eigenschappen van water vormen als het ware de randvoorwaarden voor de biologische eigenschappen van vissen.

#### Literatuur

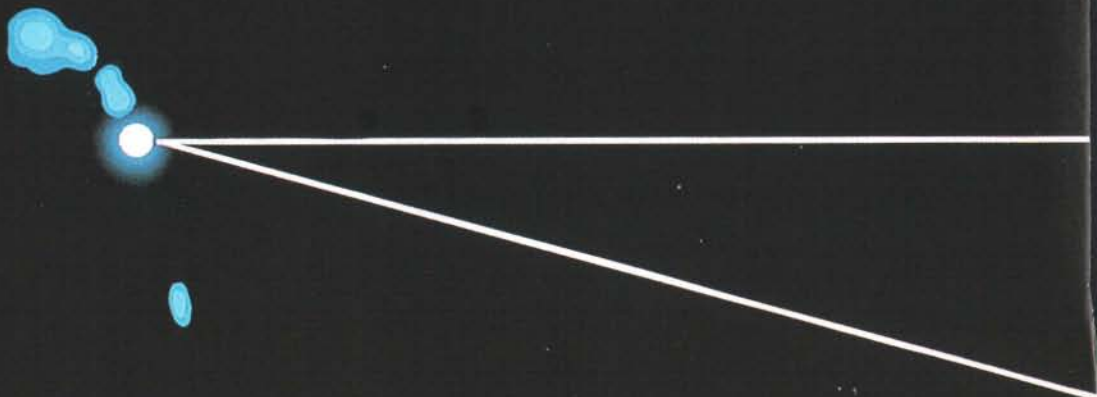
McMahon TA, Bonner JT. De maat van het leven — Hoe de natuur haar eigen wetten gehoorzaamt. Maastricht: Wetenschappelijke Bibliotheek, Natuur en Techniek, 1987.

#### Bronvermelding illustraties

Bruce Coleman Ltd, Uxbridge, UK: 130-131, 5, 6 en 13  
René Kleingeld/Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek, Yrseke: 1 en 2  
Tupper Ansel Blake/uit: Waterman TH. Animal navigation. New York: Scientific American Library, 1989: 11  
Planet Earth Pictures, Londen: 15  
De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteur.

# Fossielen van het uur nul

de vroege fasen van het heelal



Quasars behoren tot de verst van ons verwijderde en oudste objecten in het heelal. Een beter begrip van deze kleine, zeer heldere sterrenstelsels, verschaft ons mogelijk meer inzicht in de ontwikkeling van het heelal. Van sommige quasars, zoals deze geheel links, zien we vanaf Aarde twee beelden aan de hemel (groene vlak). We nemen dan niet alleen het licht waar dat in een rechte lijn van de quasar komt, maar ook het licht dat door de zwaartekracht van een tussenliggend sterrenstelsel in onze richting wordt gebogen.

**Hubert Reeves**

*CEN Saclay,  
Parijs*

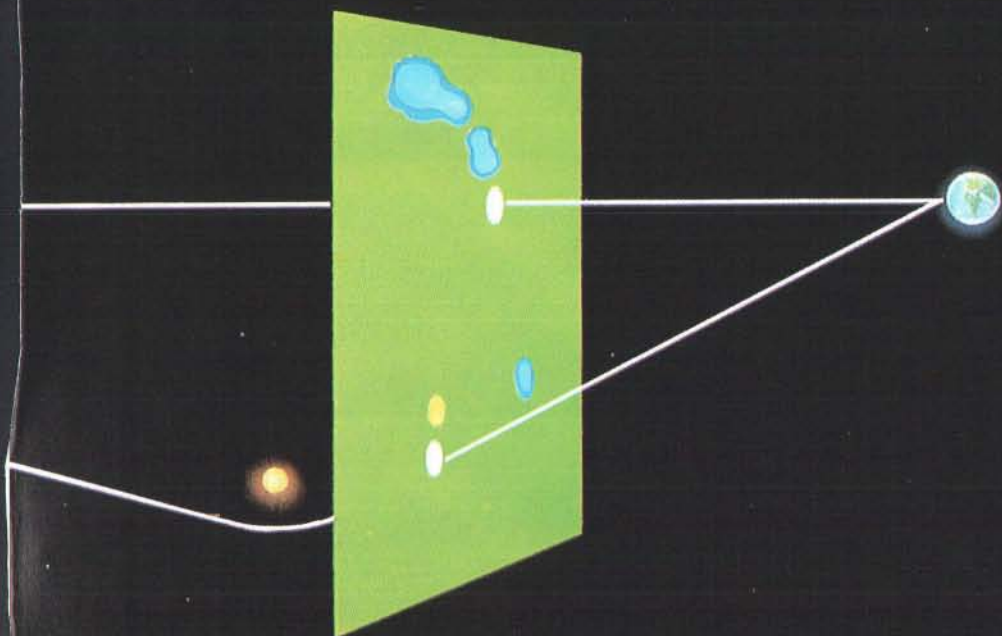
**Thijs van der Hulst**

*Kapteyn Laboratorium,  
Rijksuniversiteit Groningen*



Het heelal is er niet altijd geweest, maar is zo'n 15 miljard jaar geleden in een gigantische explosie, de oerknal, ontstaan. Sindsdien wordt het heelal al maar groter en kouder. In de loop der tijd ontstonden de elementaire deeltjes en atomen, waaruit zich alle materie in de ruimte vormde. De oerknal of 'Big Bang' had

dramatische gevolgen. Om die goed te kunnen begrijpen is het onontbeerlijk weet te hebben van het heelal vlak na de grote klap. Welke effecten van de oerknal kunnen we nu nog constateren, met andere woorden, welke 'fossielen' bestaan er die ons kunnen helpen meer over het vroege heelal te weten te komen?



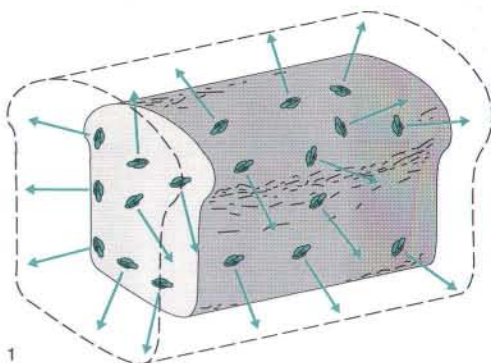
Een 'kosmologisch fossiel' is een astronomische waarneming die is bepaald door gebeurtenissen in het verre verleden. Zo'n waarneming bevat als het ware een herinnering aan het verleden en kan worden gebruikt om het verleden te reconstrueren. Zonder kosmologische fossielen kan de sterrenkundige niet in de tijd teruggaan tot het vroege heelal. De geloofwaardigheid van zijn beweringen is nauw verbonden met de aard en de betrouwbaarheid van zijn fossielen en met zijn vermogen de fossiele informatie juist te interpreteren. Heden ten dage beschikken we over een klein aantal kosmologische fossielen, die ons elk op hun eigen wijze informatie geven over een bepaald hoofdstuk in de vroege geschiedenis van het heelal.

In de jaren twintig toonde Edwin Hubble aan dat de sterrenstelsels zich van elkaar af bewegen. Deze waarneming vertelt ons dat materie in het heelal zich meer en meer verdunt naarmate de tijd voortschrijdt en dat de gemiddelde materiedichtheid in het verleden veel groter was. Met eenvoudige natuurkunde is aan te tonen dat de dichtere materie in het vroege heelal ook heter moet zijn geweest. Het verband is simpel: de temperatuur van het heelal is omgekeerd evenredig met de onderlinge afstand tussen de sterrenstelsels. Als twee sterrenstelsels twee keer zo dicht bij elkaar waren in het verleden, dan was het heelal toen twee keer zo heet.

De mate waarin sterrenstelsels zich van elkaar af bewegen is een maat voor hoe snel het heelal afkoelt. Terugrekenend kan men zo ook bepalen dat de temperatuur van het heelal vijftien miljard jaar geleden oneindig hoog was. En dat op dat moment ook de materiedichtheid oneindig hoog was. Het moment waarop deze twee grootheden *divergeren* (oneindig groot worden) wordt het 'uur nul' genoemd en gewoonlijk gezien als het ontstaan van het heelal.

### Gebrekkige natuurwetten

Het probleem is dat deze bewering een ongefundeerde extrapolatie bevat. We veronderstelden namelijk dat de natuurkundige wetten die voor lage temperaturen gelden ook bij zeer hoge temperaturen kunnen worden toegepast, maar we zullen zien dat dit fout is. Om dit te kunnen begrijpen moeten we de hulp in-



roepen van natuurkundige wetten die het gedrag van materie beschrijven. We lopen dan tegen een moeilijkheid aan die zeer belangrijk zal blijken.

Onze wetenschappelijke kennis is gebaseerd op gegevens die in het laboratorium zijn verkregen. Ze is dus beperkt door de grenzen van onze experimenten. Zo bereikt de modernste deeltjesversneller een energie van één triljoen elektronvolt ( $10^{12}$  eV), wat overeenkomt met een zogenaamde Planck-temperatuur van  $10^{16}$  Kelvin. Bij die energie ligt de limiet van onze kennis. Als we over steeds hogere energieën gaan praten wordt de theorie echter zeer speculatief en moeten we haar met toenemende voorzichtigheid en scepsis gebruiken. Dit betekent dat naarmate we het heelal in een vroeger stadium beschouwen – waarin de dichtheid steeds groter en de temperatuur steeds hoger is – we de ons bekende natuurwetten niet meer mogen toepassen.

Dit is met name het geval met de hypothetische eenwording of *unificatie* van de drie fundamentele natuurkrachten (de kernkracht, de zwakke kracht en de elektromagnetische kracht). Dit wil zeggen dat de drie krachten overgaan in één enkele kracht. Het gedrag van de krachten bij lagere energieën suggereert dat de unificatie optreedt bij  $10^{24}$  eV. We zullen hier later nog op terugkomen.

De toestand wordt volledig hopeloos als we de desastreuze energie van  $10^{28}$  eV bereiken, die overeenkomt met een temperatuur van  $10^{32}$  K. Bij deze hoge temperatuur is het heelal heel eenvoudig geworden en bestaat er nog maar één soort deeltjes. De gewone natuurkundige wetten, met inbegrip van de relativiteitstheorie, kunnen de toestand van het heelal



onder deze omstandigheden niet meer beschrijven. We weten niets over de wetten die het gedrag van materie onder zulke omstandigheden bepalen.

Omdat de sterrenstelsels zich van elkaar af bewegen weten we dat het heelal in het verleden dichter en warmer was. Om de bovengenoemde moeilijkheden te vermijden moeten we beginnen met de juiste vraag: hoe heet is het heelal in het verleden geweest? Hebben we empirische gegevens voor de veronderstelling dat de temperatuur duizend, miljoen of miljard graden is geweest?

### Fossiele straling

De ontdekking van de 3 Kelvin achtergrondstraling door Penzias en Wilson in 1965 was van fundamenteel belang voor het oerknalmodel. Deze achtergrondstraling is overal om ons heen: het is een heelal-vullend stralingsveld. De straling is uit alle richtingen even sterk. De gemiddelde energie van de fotonen uit de achtergrondstraling komt overeen met het stralingsveld van een zwart lichaam met een temperatuur van 3 Kelvin. We zouden de achtergrond kunnen beschouwen als het 'nagloeien' van het heelal na de oerknal.

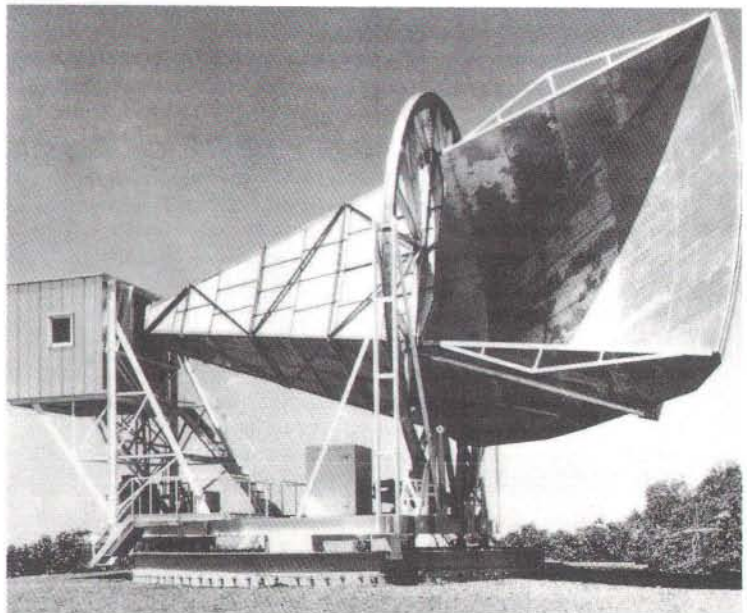
Het stralingsveld kon ontstaan toen het heelal was afgekoeld tot 3000 K. Boven 3000 K zijn de meeste waterstofatomen – het meest voorkomende element in het heelal – in geïoniseerde toestand. De vele vrije elektronen konden de straling in het heelal uiterst effectief verstrooien; de ruimte was ondoorzichtig. Pas toen het heelal zo koud was geworden dat de meeste elektronen aan atoomkernen gebonden waren, kregen de overgebleven fotonen vrije doorgang. Zij vormen de achtergrondstraling, die intussen, als gevolg van 15 miljard jaar expansie, tot 3 K is afgekoeld. Het voorkomen van de achtergrondstraling houdt in dat het heelal een temperatuur van tenminste 3000 K gehad moet hebben. Het is het eerste fossiel uit het vroege heelal.

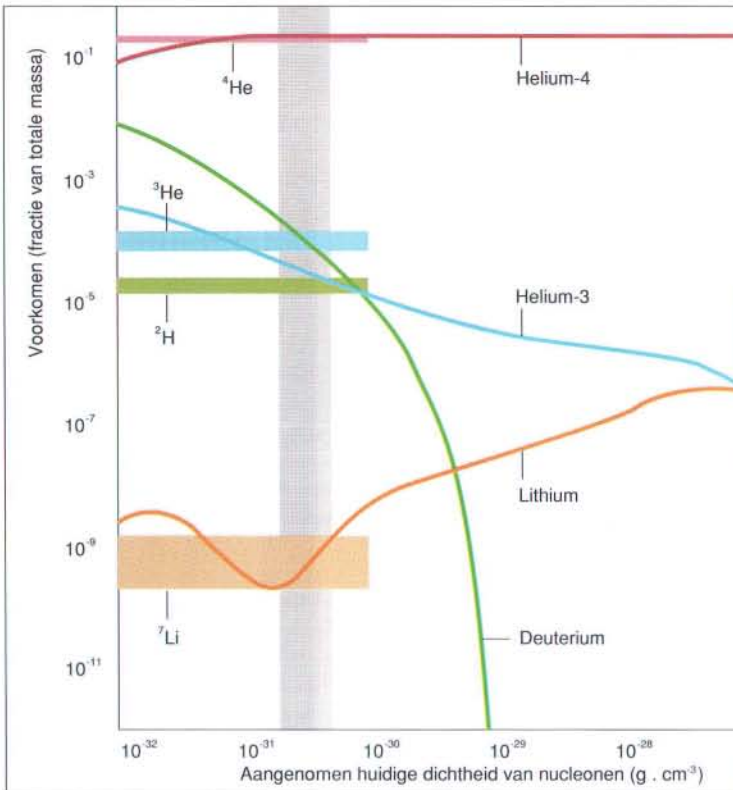
### Verbrandingsresten

De verhouding waarin de isotopen van waterstof, helium en lithium voorkomen is het tweede kosmologische fossiel. Als we bereid zijn aan te nemen dat het heelal veel heter is geweest dan 3000 K en een temperatuur van tien miljard graden heeft gehad ( $10^6$  eV), dan moet het een periode met kernreacties doorgemaakt hebben. De brandstof was een mengsel

1. De waarneming van Hubble dat alle sterrenstelsels zich van elkaar af bewegen is een sterke aanwijzing voor een uitdijend heelal, waarin de dichtheid steeds kleiner wordt. Dit is te vergelijken met de krenten in een rijzend krentenbrood, die ook steeds verder uit elkaar gaan.

2. Bij experimenten met deze hoornantenne ontdekten Arno Penzias en Robert Wilson een ruis, die veel sterker was dan ze voor deze antenne verwachtten. Ze realiseerden zich dat het een overblijfsel van de oerknal moest zijn: de 3 K achtergrondstraling.





3

3. Er bestaat een model dat het voorkomen van lichte isotopen in het heelal nauwkeurig voorspelt. Dat voorkomen is afhankelijk van de huidige dichtheid van nucleonen en is weergegeven in de curven in de grafiek. Nu blijkt dat de waarnemingen (horizontale balken; hoe dunner hoe nauwkeuriger) voor een bepaalde dichtheid (de grijze band) uitstekend overeenkomen met de voorspellingen.

4. De Orionnevel is een grote gas- en stofnevel die door jonge sterren tot lichten wordt gebracht. De nevel bestaat grotendeels uit waterstof en helium.

5. Een planetaire nevel, zoals deze in het sterrebeeld Vulpecula, markeert het einde van het leven van een ster die niet zwaarder is dan vijf zonnemassa's. De ster blijft als een hete witte dwerg middel in de nevel achter. De nevel bevat tal van zware elementen die in de ster zijn geproduceerd.

van protonen en neutronen, die bij deze hoge temperatuur met een constante verhouding voorkwamen. De verbrandingsresten waren voornamelijk deuterium, de twee isotopen van helium en de zware isotoop van lithium.

Berekeningen laten zien dat men met redelijke aannames betreffende de huidige dichtheid van nucleonen (protonen en neutronen) en het aantal soorten elementaire deeltjes, het relatief voorkomen van de verbrandingsresten bevredigend kan verklaren. Dit rechtvaardigt de stelling dat het heelal een temperatuur van ten minste tien miljard graden heeft gehad. Dat was ongeveer een miljoen jaar voordat bij een temperatuur van 3000 K de fossiele straling werd uitgezonden.

Dit argument omdraaiend kunnen we zeggen dat de aanname van kernreacties in het zeer vroege heelal een voorspelling over de dichtheid van kernen in het heelal oplevert, die in overeenstemming is met de huidige sterrenkundige waarnemingen van de dichtheid van

de materie en de zogenaamde donkere materie (de materie die het zwaartekrachtsveld bepaalt, maar geen licht uitzendt en dus onzichtbaar is). Een andere voorspelling is dat er 3 of 4 soorten elementaire deeltjes zijn. Deze voorspelling is onlangs door experimenten bij CERN in Genève bevestigd.

### Elementaire deeltjes

In de moderne fysica worden de elementaire deeltjes in drie deeltjesfamilies ingedeeld: de elektron-achtige, de muon-achtige en de tauon-achtige deeltjes. Elke deeltjesfamilie heeft vier leden: twee leptonen en twee quarks. Bij elk soort deeltje uit de ene familie is er een overeenkomstig deeltje in de andere twee families die, voor zover we weten, alleen verschillen in massa. Het elektron (0,5 MeV; we kunnen massa als een energie schrijven via de door Einstein gevonden relatie  $E = mc^2$ ) bijvoorbeeld komt overeen met het muon (1,07 MeV)





4



5

uit de muonenfamilie en met het tauon (1,5 GeV) uit de tauonenfamilie.

De tabel laat de drie families zien, met de beste schattingen van de massa's (uitgedrukt in de energie-eenheid elektronvolt) der deeltjes. De massa van het neutrino is op dit moment niet goed bekend en we kunnen alleen bovenlimieten geven. Het bestaan van het t-quark is nog niet aangetoond.

De grote vraag is hoeveel meer deeltjesfamilies er in het heelal zijn. Een paar jaar geleden kon de hoge-energiefysica nog heel weinig zeggen over deze vraag. De *oerknal-nucleosynthesetheorie*, die de vorming van waterstof, deuterium, helium en lithium in het vroege heelal beschrijft, leidde tot hele duidelijke voorspellingen. Het aantal families kan niet erg groot zijn: één of twee, mogelijk drie, maar zeker niet meer.

De experimenten die leidden tot de ontdekking van het W- en het Z-deeltje (die verantwoordelijk zijn voor de zwakke wisselwerkingen)

gen) hebben de voorspelling van de oerknal-nucleosynthesetheorie dat er ten hoogste drie families zijn bevestigd. De preciese energieverdeling van deze deeltjes is een indicatie van het aantal families en is nu vrij nauwkeurig bepaald. In de volgende alinea's zullen we met behulp van fysische argumenten deze bewering verder staven.

We willen op dit moment van de gelegenheid gebruik maken om het belang van de gebeurtenis die we hier bespreken te benadrukken, temeer omdat een groot deel van de wetenschappelijke wereld dit over het hoofd lijkt te hebben gezien. We moeten niet vergeten dat de oerknal-nucleosynthesetheorie een nogal extravagante theorie is, binnen de gangbare wetenschappelijke tradities. Zij plaatst het heelal in een historische context, dit in tegenstelling tot de sinds de oude Grieken en de Renaissance ondubbelzinnig hoog gehouden wetenschappelijke traditie. In plaats van een eeuwige, niet veranderende werkelijkheid waar te nemen, wordt de astrofysicus een historicus die het verleden verkent op zoek naar gebeurtenissen die vorm hebben gegeven aan de wereld van vandaag. Een soortgelijke overgang heeft ook in de biologie plaatsgevonden toen Darwin de 'onveranderlijkheid' van de plant- en diersoorten ontkende en het idee van biologische evolutie introduceerde. Met de oerknaltheorie is deze idee tot het hele heelal uitgebreid.

Hoe buitenissiger een theorie is, des te beter moet de onderbouwing zijn voordat zo'n theorie wordt geaccepteerd. Het is daarbij van groot belang om voorspellingen te kunnen bevestigen, omdat het gemakkelijker is verklaringen te vinden voor bekende feiten, dan een toekomstige waarneming of het resultaat van een experiment juist te voorspellen. Nadat de oerknaltheorie het bestaan van het fossiele stralingsveld correct had voorspeld, heeft zij ook met succes de verbreiding van de deeltjes-families kunnen verklaren.

### Materie, antimaterie en licht

De fossielen die we eerder hier bespraken — de 3 K achtergrondstraling en de 'bevolkingsopbouw' van de lichte kernen — liggen binnen het bereik van de energieën waar de experimentele natuurkunde vertrouwd mee is: een paar honderd elektronvolt voor het eerste fossiel en een paar miljoen voor het laatste. Onze

onbekendheid met de fysica bij hogere energieën bracht echter al enige onzekerheid met zich mee. Die moeilijkheid, zelfs nijpender, doet zich ook voor bij het volgende fossiel.

Er zijn in het heelal ongeveer één miljard fotonen per nucleon (neutron of proton). De grote meerderheid van deze fotonen behoort tot het 3 K stralingsveld. Alle andere fotonen die door de ruimte zwermen zijn voornamelijk afkomstig van sterren en bedragen slechts één promille van de 3 K achtergrond.

Waarom zijn er één miljard fotonen per kerndeeltje? Waarom geen 36 of 0,12? In wetenschappelijk onderzoek ligt achter elk getal de vraag verborgen: waarom juist dit getal? Eén miljard is een fossiel als het ons iets kan leren over het vroege heelal.

Voordat we op deze vraag een antwoord proberen te geven moeten we eerst een andere vraag stellen. Beide vragen zullen hetzelfde antwoord hebben en dit antwoord zal ons oudste fossiel blijken te zijn. Deze vraag is: waarom nemen we geen antimaterie waar in het heelal?

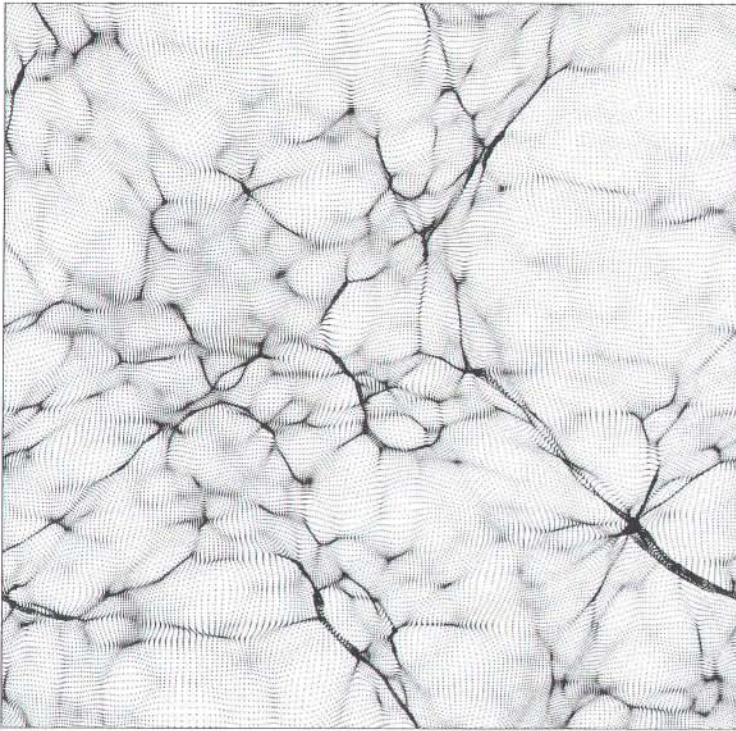
De grondslag voor deze vraag is de bevestiging in laboratoriumexperimenten, dat er al-

TABEL Familie-album der elementaire deeltjes

	Elektron-achtige deeltjes	Muon-achtige deeltjes	Tauon-achtige deeltjes
Leptonen	Elektron-neutrino < 10 eV	Muon-neutrino < 25 MeV	Tauon-neutrino < 100 MeV
	Elektron 0,5 MeV	Muon 0,1 GeV	Tauon 1,5 GeV
Quarks	Quark-u 0,3 GeV	Quark-c 1,5 GeV	Quark-t > 60 GeV
	Quark-d 0,3 GeV	Quark-s 0,5 GeV	Quark-b 5,0 GeV

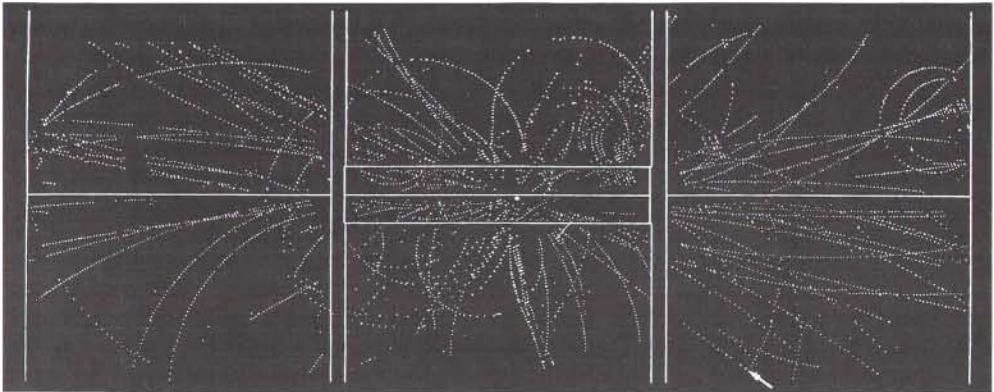
tijd een symmetrie is tussen materie en antimaterie. Telkens als een botsing van kernen een materiedeeltje produceert, produceert het ook een antimateriedeeltje. Bij elk elektron wordt een anti-elektron geproduceerd, bij elk neutron een antineutron, bij elk proton een anti-proton. Deze regel kent geen uitzonderingen.





6. Sterrenstelsels zijn niet lukraak over het heelal verdeeld maar komen in clusters voor. Vermoedelijk zijn dergelijke grote structuren al in het vroege heelal ontstaan. Met computersimulaties van zwaartekrachtinteracties tussen puntmassa's probeert men inzicht te krijgen in de structuur van het heelal.

6



7

Met uitzondering van enkele antideeltjes in de kosmische straling nemen we echter geen 'natuurlijke' antideeltjes waar, noch op Aarde, noch in het Zonnestelsel, noch in de Melkweg of in andere sterrenstelsels. Enkele hele verre sterrenstelsels zouden uit antimaterie kunnen bestaan, maar we hebben geen reden

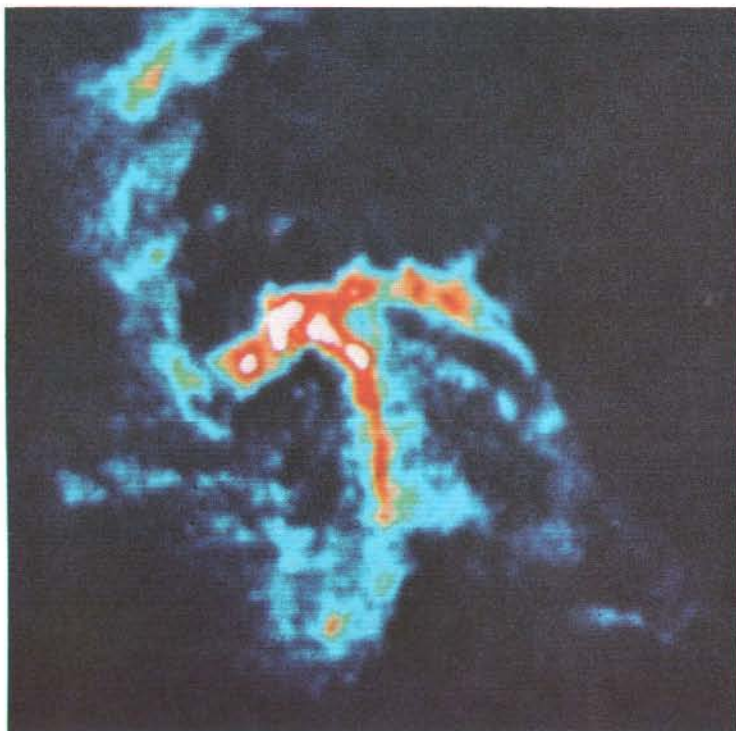
om aan te nemen dat dit zo is. Waarom is het heelal zo duidelijk asymmetrisch?

Eén gezamenlijk antwoord op beide vragen – waarom één miljard fotonen per kerndeeltje en waarom is er zo'n grote materie-antimaterie-asymmetrie in de natuur – zou opgesloten kunnen liggen in het unificatie-idee voor de

8. In het vroege heelal was de zwaartekracht extreem hoog. Hoge zwaartekrachtvelden komen voor in zwarte gaten. Dit Seyfert-stelsel heeft er waarschijnlijk een als kern.

9. De afkoeling van het heelal vanaf de planck-era tot heden. De figuur laat enkele belangrijke gebeurtenissen zien.

10. De hoge-energiefysica levert kennis van elementaire deeltjes, dankzij experimenten met enorme versnellers en detectoren. Deze detector moet de deeltjes registreren die bij de botsing van een elektron met een anti-elektron ontstaan.



natuurkrachten. De veronderstelling in deze theorie is dat de materie in het heelal bij temperaturen boven de  $10^{28}$  K ( $10^{24}$  eV) symmetrisch is geweest – met gelijke hoeveelheden materie, antimaterie en ook fotonen – en dat de elektromagnetische-, zwakke- en kernkrachten identiek zijn geweest. Rond deze temperatuur heeft zich vervolgens een aantal processen voltrokken die tot een differentiatie van deze krachten hebben geleid (verschillende sterkte en bereik). Deze processen zouden en passant een kleine asymmetrie hebben gecreëerd: één extra materiedeeltje per miljard materiedeeltjes, antimateriedeeltjes en fotonen. Later, na een fase met ongebreidelde *annihilatie* (vernietiging) tussen materie en antimaterie, zou alleen dit overschot aan deeltjes zonder antideeltje zijn overgebleven. Uit dit overschot zou alle materie in het heelal zijn voortgekomen, met een verhouding van één materiedeeltje per miljard fotonen zonder overgebleven antimaterie.

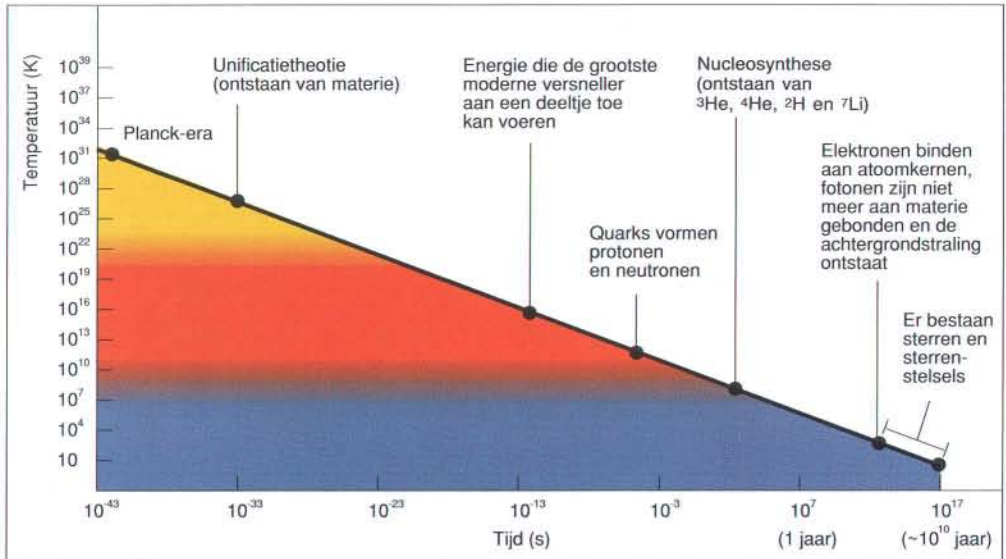
We kunnen dus zeggen dat het aantal fotonen ten opzichte van het aantal kernen, te za-

men met de afwezigheid van antimaterie, beschouwd kan worden als een kosmologisch fossiel dat ons vertelt dat het heelal eens heter was dan  $10^{28}$  K. Deze gebeurtenissen vonden ongeveer honderd seconden vóór de nucleosynthese plaats.

Dergelijke energieën ( $10^{24}$  eV) zijn vele malen groter dan de energieën die we in de beste deeltjesversnellers opwekken ( $10^{12}$  eV). De extrapolatie naar deze hoge energieën is groot en verraderlijk. Desondanks lijkt het algemene beeld te kloppen, hoewel het nog lang niet in een definitieve vorm gegoten is.

Samenvattend hebben we in het heelal tot nu toe drie kosmologische fossielen gevonden, die ons in staat hebben gesteld aannemelijk te maken dat het heelal, als we in de tijd teruggaan, zo'n 15 miljard jaar geleden een temperatuur van  $3 \cdot 10^3$  K had, een miljoen jaar daarvoor een temperatuur van  $10^{10}$  K had en een paar minuten daarvoor een temperatuur van  $10^{28}$  K. De lezer heeft de snelle afname in de tussenliggende tijdsintervallen ongetwijfeld opgemerkt.





9



10

### De hel van Planck

Kunnen we nog verder in de tijd teruggaan? Op dit moment kennen we geen fossielen die zo'n stap zouden rechtvaardigen. Bovendien weten we, zoals eerder opgemerkt, dat we in grote moeilijkheden raken als we dat toch proberen. We belanden dan in de zogenoemde *Planck-era*.

Er zijn twee basistheorieën in de fysica die

allebei zeer goed op hun eigen terrein toepasbaar zijn: de quantumfysica en de algemene relativiteitstheorie. De quantumfysica is zeer geschikt voor het beschrijven van atomen, molekulen en hun onderlinge wisselwerking. Deze wisselwerking wordt beschreven met velden. Meer algemeen: de moderne fysica is een samenstel van veldtheorieën, elk toepasbaar op één van de fundamentele krachten: de elektromagnetische-, de zwakke-, de kern- en de zwaartekracht. De voorspellende waarde van de quantumfysica is zeer hoog, maar is beperkt tot situaties waarin het zwaartekrachtveld geen dominerende rol speelt.

De algemene relativiteitstheorie is daarentegen zeer geschikt voor het berekenen van bewegingen in zwaartekrachtvelden, maar houdt geen rekening met quantumeffecten. Zij kan met name geen rekening houden met het feit dat materie niet alleen uit puntmassa's bestaat, die altijd precies te traceren zijn in ruimte en tijd, maar juist uit quantumvelden die onderworpen zijn aan het onzekerheidsprincipe van Heisenberg en nogal vreemde mathematische eigenschappen bezitten.

Het fundamentele probleem in de moderne kosmologie kan op de volgende manier worden verwoord. Als we onze verkenning uit willen breiden tot een temperatuur van zo'n  $10^{32}$  K dan moeten we materie bestuderen die zo'n



11

hoge dichtheid heeft dat we zowel de algemene relativiteitstheorie (wegens het buitengewoon sterke zwaartekrachtveld) alsook de quantumfysica (materie moet als een quantumveld beschreven worden) nodig hebben. Daar komen we de moeilijkheden tegen.

Het probleem zit hem niet in de waarnemingen. Er zijn géén waarnemingen die niet met de voorspellingen van de theorie overeenkomen. De moeilijkheden worden veroorzaakt door het gebrek aan samenhang binnen de theorie. In technische termen is de theorie niet 'opnieuw normaliseerbaar'. Dit betekent dat de berekende waarschijnlijkheid dat een bepaald proces plaatsvindt oneindig groot wordt, terwijl een acceptabel antwoord tussen 0 en 1 moet liggen.

Een manier om deze situatie te beschrijven is te beweren dat in de Planck-era er voor een gegeven temperatuur en dichtheid een conflict ontstaat betreffende de mogelijkheid om een deeltje te lokaliseren. De traditionele onzeker-

heden van de quantumfysica stellen een grens aan deze mogelijkheid. De invloed van een sterk zwaartekrachtveld daarentegen impliceert de mogelijkheid om een object precies te lokaliseren. Men kan ook zeggen dat de fluctuaties in het quantumveld op een onvoorziene manier het raamwerk van tijd en ruimte, waarin de verschijnselen beschreven door de relativiteitstheorie plaatsvinden, veranderen.

Samenvattend hebben we geen fysische theorie die in staat is de toestand van materie bij een temperatuur van  $10^{32}$  K te beschrijven. De Planck-era kan beschouwd worden als het tijdperk buiten de grens van onze huidige kennis, zij ligt voorbij de limiet wat betreft de voorstelbare temperatuur van het heelal en achter de horizon van onze verkenning van het verleden. Niemand weet of hogere temperaturen mogelijk zijn; niemand weet of er nog een betekenis is voor de begrippen temperatuur, energie, massa, snelheid, tijd en ruimte. We begrijpen nu dat de vraag: 'wat was er eerder'

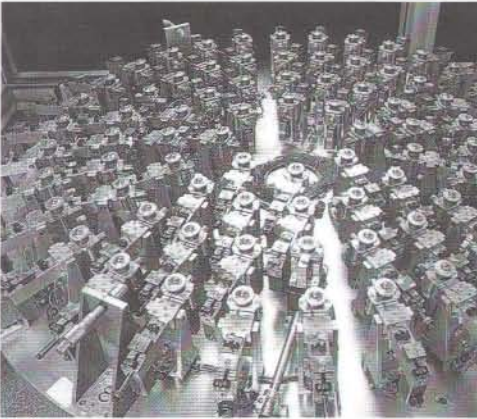


11. Deze twee sterrenstelsels zijn elkaar zo dicht genaderd, dat hun wederzijdse aantrekkingskracht ten gevolge van de zwaartekracht

de spiraalstructuur geheel heeft vervormd. Mogelijk kunnen ze niet meer uit elkaar greep ontsnappen en blijft er één stelsel over.

12. Om de oerknalhypothese te toetsen moeten we zeer ver in het heelal naar zeer oude objecten kunnen kijken. Daarvoor zijn geavanceerde telescopen

nodig. Hier zien we een model van de verstelbare spiegelondersteuning van zo'n telescoop, die een dunne spiegel in de juiste vorm.



12

de fysisch sprakeloos laat. Hij weet niet meer wat het woord 'eerder' zou kunnen betekenen.

Uit de fossielen hebben we kunnen concluderen dat het heelal in het verleden heel heet is geweest. Tenminste miljarden graden tijdens de nucleosynthese en misschien  $10^{28}$  graden om de huidige bevolking aan fotonen te kunnen produceren en om de afwezigheid van antimaterie in onze omgeving te kunnen veroorzaken. De huidige stand van zaken onder de fysische theorieën leidt tot de conclusie dat er in ieder geval een 'muur van onwetendheid' voor ons is opgetrokken rond nog hogere temperaturen. Wat we 'zien' zijn niet de grenzen van het heelal, maar de grenzen van onze eigen kennis. We kunnen *niets* zeggen over wat er 'daarvoor' in tijd of 'daarboven' in temperatuur was. Alle aanspraak op verklaringen voor het 'ontstaan' of 'waarom er iets is in plaats van niets' moeten vervangen worden door de bewering dat we er gewoon zonder meer niets van weten.

Misschien zullen de inspanningen van de theoretici er eens toe leiden, dat de begrippen ruimte en tijd hun traditionele betekenis ook bij extreem hoge energieën terugkrijgen. We kunnen dan opnieuw de vraag 'en wat was er daarvoor' stellen. Maar de woorden 'de eerste momenten van het heelal' kunnen ook een nieuwe betekenis krijgen. Als het begrip tijd inderdaad niet meer van toepassing is boven de temperatuurgrens van de Planck-era, wordt het bij een lagere temperatuur van toepassing. We kunnen dan de woorden 'de eerste momenten' niet gebruiken op de ongefundeerde manier als in 'wat volgt er na het uur nul', maar in de zin dat vanaf dat moment het begrip tijd van toepassing is. Men zou in de verleiding komen om te schrijven dat bij deze lagere temperatuur het begrip tijd 'voor het eerst' van toepassing is, ware het niet dat deze formulering nogal dubbelzinnig is.

Dit artikel is gebaseerd op een hoofdstuk uit het boek *Het Heelal - Waarvandaan? Waarheen?*, onder redactie van Theo Jurriens en Hugo van Woerden. Het boek is uitgegeven door De Feniks Pers, Meppel in het kader van 375 jaar Rijksuniversiteit Groningen in 1989.

#### Literatuur

- Weinberg S. De eerste drie minuten - Nieuwe inzichten over het ontstaan van het heelal. Maastricht/Brussel: Natuur en techniek, 1983.  
 Cornell J, red. Bubbles, voids and bumps in time: the new cosmology. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1989.  
 Lederman LM, Schramm DN. From quarks to the cosmos. New York: Scientific American Library, 1989. Dit boek verschijnt in maart 1991 in de Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur en Techniek onder de titel: Van quark tot kosmos.  
 Hoyle F, Wickramasinghe Ch. Big bang of steady state. Natuur en Techniek 1989; 57: 6, 446-457.

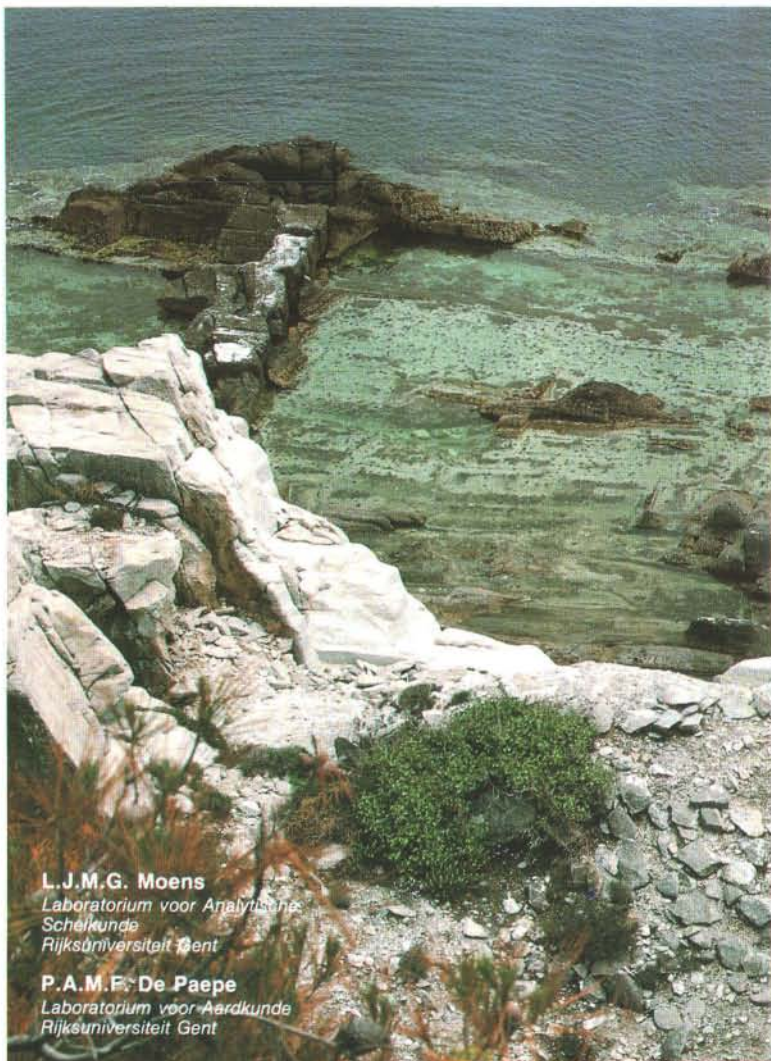
#### Bronvermelding illustraties

- David Parker/Science Photo Library, Londen: 142-143  
 AT&T-archieven: 2  
 US Naval Observatory: 4  
 Mount Palomar Observatory: 5  
 Adrian Mellot/University of Kansas: 6  
 CERN, Genève, CH: 7 en 10  
 NASA-JPL, Pasadena: 8  
 volgt: 11  
 ESO, Garching, D: 12

## WEGWIJS IN

# MAR

Weinig natuursteen-soorten ogen zo aantrekkelijk en decoratief als wit marmer. In de beeldende kunst en het economisch bestel van Hellas en Rome speelde wit marmer al een belangrijke rol, terwijl het nadien niets van zijn esthetische en commerciële waarde inboette. Door een combinatie van diverse natuurwetenschappelijke technieken en statistische methoden slaagde een onderzoeksteam er onlangs in om een groot aantal fysische eigenschappen van wit marmer te kwantificeren en op die

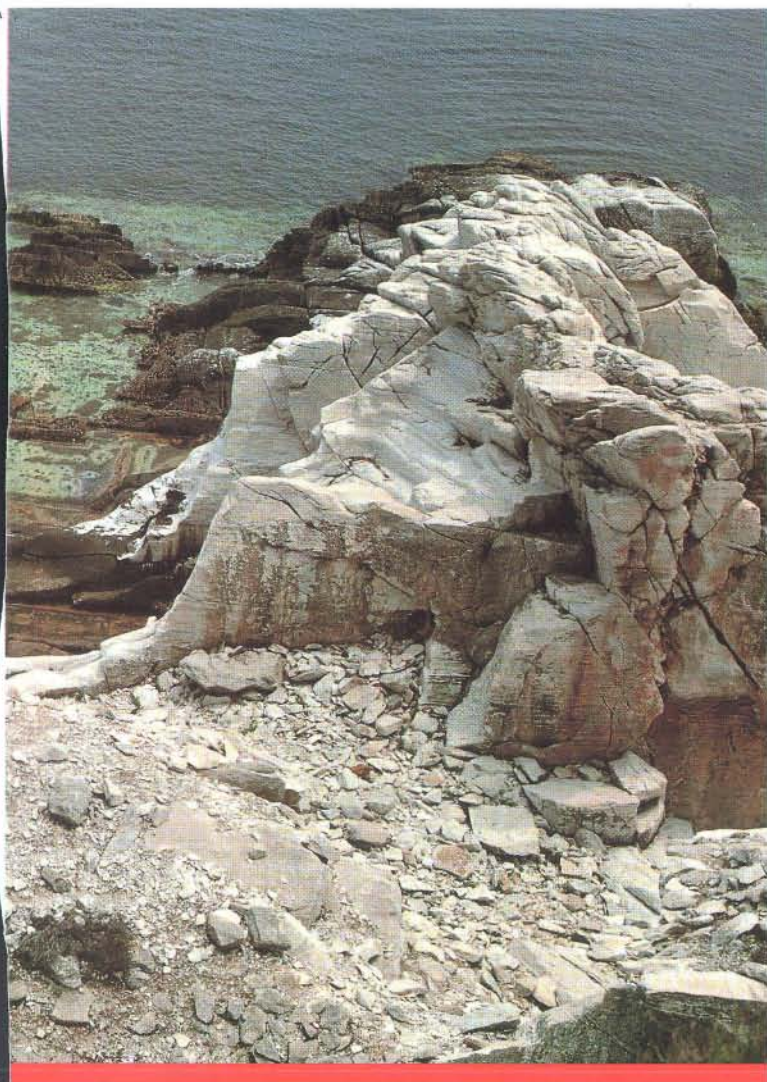


**L.J.M.G. Moens**  
*Laboratorium voor Analytische  
Schelkunde  
Rijksuniversiteit Gent*

**P.A.M.F. De Paepe**  
*Laboratorium voor Aardkunde  
Rijksuniversiteit Gent*



# MER



Tegenwoordig overspoelt de Egeïsche Zee de groeve van Alikí op de zuidkust van het

eiland Thasos. Eerder stond het water niet zo hoog. Vanaf de archaische periode

(zevende eeuw v. C.) tot in de Byzantijnse periode kapte men uit deze groeve wit marmer.

manier een 'vingerafdruk' te nemen van verschillende antieke marmersoorten. Het verkregen gegevensbestand laat toe om de plaats van herkomst van het marmer te bepalen, dat in kunstwerken uit een der welk tijdperk zit verwerkt. De nieuwe aanpak in het marmeronderzoek is van grote betekenis voor de reconstructie van vroeger handelsverkeer, de datering van groeven, het opsporen van vervalsingen en het uitvoeren van verantwoorde restauraties.

Het delven van wit marmer in het Middellandse-Zeegebied kwam in de late zevende en de zesde eeuw v.C. op gang met Paros en Naxos in de Cycladen als de belangrijkste leveranciers. In de daarop volgende eeuwen kenden de uitbatingen en werkplaatsen op deze eilanden een ongekennde bloei ten gevolge van de toenevende vraag naar decoratieve steensoorten. Ook in andere regio's werden groeven geopend en er kwam een zeer dynamische, grootschalige marmerhandel op gang. Ladingen van scheepswrakken uit de Griekse en de Romeinse periode – die bij honderden zijn aangetroffen op de ondiepe zeebodem voor de oostkust van Sicilië, bezuiden Italië, rond de Ionische eilanden, de Peloponnesus en Kreta, en langs de Aziatische kust van Turkije – tonen aan dat er in de oude wereld op grote schaal marmer is getransporteerd. In 1958 werd bijvoorbeeld bij de Isole delle Correnti, aan de zuidoostpunt van Sicilië, het wrak ontdekt van een Romeins vaartuig. In het ruim lag 350 ton marmer, vooral halfafgewerkte en gebruiksklare sarcophagen afkomstig van verschillende gebieden in en rond de Egeïsche Zee.

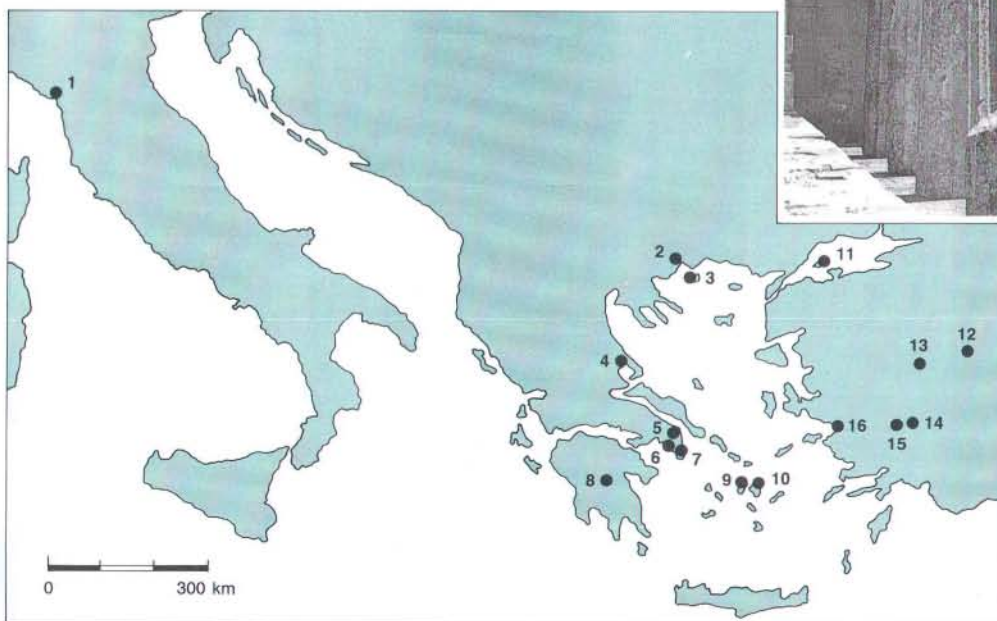
Dank zij muntvondsten of aantekeningen op het marmer, slagen de archeologen er dikwijls in deze historische scheepswrakken te da-

## Ontstaan van marmer

Het marmer uit het groevegebied van Carrara heeft een voorgeschiedenis van meer dan 150 miljoen jaar. Het ontwikkelde zich uit kalkrijke sedimenten die zich afzetten op de bodem van de Tethys-zee, een voorloper van de Middellandse Zee. Tijdens de alpine gebergtevorming, die vanaf het Krijt-tijdperk het aangezicht van het grensgebied tussen Europa en Afrika ingrijpend veranderde, werden deze kalkgesteenten geplooid en opgestuwd tot bergketens. Daarbij stonden de kalkgesteenten bloot aan hoge druk en temperatuur, wat uiteindelijk leidde tot een



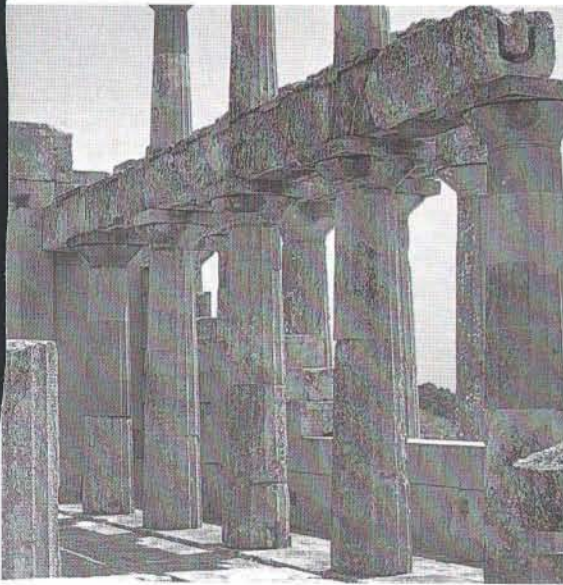
1 en 2. Reeds in de oudheid leverden de belangrijkste groevegebieden (1) wit marmer voor de aanleg van straten en gebouwen. Kleinere zuilen dan deze in Efese hakte men vaak in hun geheel uit.





volledige herkristallisatie, of metamorfose, van het oorspronkelijke materiaal. De fijne calciëtkorrels van de kalksteen zetten zich om tot grote, meer zuivere kristallen met goed ontwikkelde splijtingsvlakken en een typische glans. Het gesteente kreeg hierdoor een suikerachtig uiterlijk. Marmers met grillige adertekening in geel, bruin of grijs ontstonden op identieke wijze uit kalkstenen die, naast calciëtk en eventueel dolomiet, veel onzuiverheden bevatten. Dit verklaart waarom ze vaak samen met witte marmers voorkomen.

De rode en zwarte, al dan niet geaderde en gevlekte Belgische 'marmers' hebben nooit een metamorfose ondergaan onder invloed van hoge druk en temperatuur. Ondanks hun makkelijke polijstbaarheid en erg decoratief uiterlijk kan men ze dus moeilijk als echte marmers bestempelen, hoewel kunstenaars en bouwvakkers dit gewoonlijk wel doen. Het gaat in feite om gewone kalksteen. De Belgische zwarte 'marmers' zonder aders of vlekken zijn nochtans even zeldzaam als het befaamde witte marmer uit het Middellandse-Zeegebied.



- 1 Carrara
- 2 Filippi
- 3 Thasos
- 4 Volos
- 5 Pentelikon
- 6 Hymettos
- 7 Thorikos
- 8 Doliana
- 9 Paros
- 10 Naxos
- 11 Marmara
- 12 Afyon
- 13 Uşak
- 14 Denizli
- 15 Aphrodisias
- 16 Ephesos

teren. Slechts bij uitzondering is het echter mogelijk om de plaats van herkomst van de marmerlading te achterhalen. Dit geldt ook voor de meeste witmarmers voorwerpen die sinds de klassieke oudheid in groten getale op archeologische vindplaatsen van het Middellandse-Zeegebied zijn blootgelegd. In tegenstelling met wat sommige onderzoekers wel eens beweren, laten bijvoorbeeld de kleur, de korrel, de adertekening of het vlekkenpatroon niet toe het marmer van antieke kunstwerken naar de plaats van herkomst te onderscheiden. Ook mag men niet uit het oog verliezen dat een kunstwerk meestal duizenden jaren in de bodem ingegraven is geweest of aan de atmosfeer heeft blootgestaan. Hierdoor krijgt het marmer een patina dat er, naar gelang de omstandigheden van de bewaring, zeer verschillend kan uitzien. Maar hoe valt dan wel vast te stellen in welk groevegebied een stuk marmer ooit is uitgehakt?

Zoals opgemerkt zijn de belangrijkste vindplaatsen van mediterrane wit marmer al meer dan 2000 jaar bekend (afb. 1). De wordingsgeschiedenis van dit marmer is erg complex en sterk getekend door de alpine gebergtevorming (zie Intermezzo I). Het betreft gesteenten met een gehalte van meestal meer dan 98% aan carbonaten; praktisch uitsluitend *calciëtk* (calciumcarbonaat) of *dolomiet* (calcium-magnesiumcarbonaat). Calciëtrijke marmers zijn in de meerderheid. Sterk dolomiethoudende soorten zijn op het eiland Thasos goed vertegenwoordigd, maar elders komen ze slechts sporadisch voor.

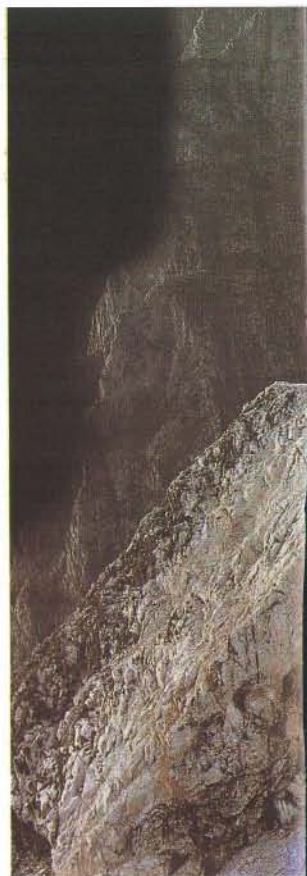
Nu is het een gok om te verwachten dat natuurwetenschappelijke methoden een eenduidige herkomstbepaling van wit marmer toelaten. We zullen zien dat als er al fysisch meetbare verschillen tussen de marmers van verschillende groevegebieden bestaan, deze zeer subtiel zijn. En of deze verschillen belangrijker zijn dan die tussen de marmers binnen één groevegebied is nog maar de vraag. Om hierover uitsluitsel te krijgen moeten vele stalen uit de antieke groeven worden geanalyseerd. Pas dan zal blijken of de toegepaste methoden bruikbare informatie opleveren om de marmers van elkaar te onderscheiden. De Gentse onderzoeksgroep die dit project ten uitvoer bracht, begon ermee marmerstalen te nemen in de belangrijkste antieke groevegebieden. Ongeveer 200 van deze monsters onderwierp men vervolgens aan drie verschillende onderzoeksmethoden: *isotopenanalyse*, *chemische analyse* en *microscopie*.

### Isotopenanalyse

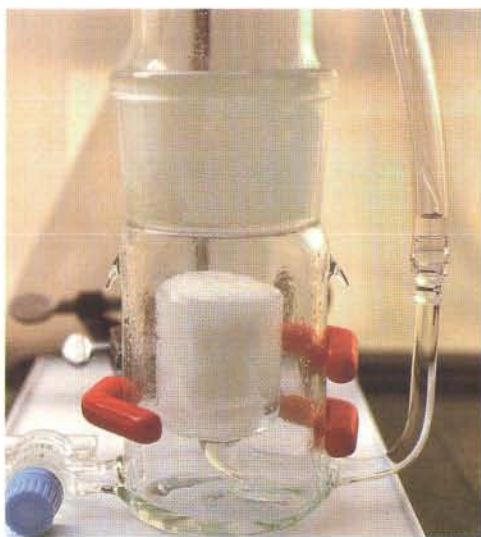
In schoolboeken staat vaak dat de stabiele isotopen van een element overal in de natuur in dezelfde verhouding voorkomen. Dat klopt niet helemaal. Er treden wel degelijk kleine verschillen op. Dit geldt vooral voor de isotopen van lichtere elementen en voor isotopen die het eindproduct zijn van een keten van ra-

3 en 4. Wanneer men marmer met een zuur etst (3) of het erin oplost, komen water en koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ) vrij. Het relatieve voorkomen van  $^{13}\text{C}$  en van  $^{18}\text{O}$  in marmer bepaalt men door het  $\text{CO}_2$  te analyseren. Uit opgevangen gas wordt in een eerste koelgang het water verwijderd, terwijl in een tweede vat met vloeibaar stikstof bij  $-196^\circ\text{C}$  het  $\text{CO}_2$  bevriest in een glazen buisje, dat verzegeld kan worden en in de inlaat van een massaspectrometer past (4).

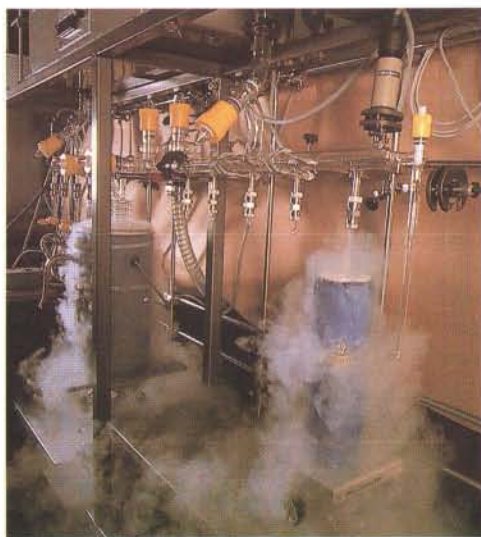
5. De Gentse onderzoeksgroep nam monsters van ongeveer 1 kg op verschillende plaatsen in diverse antieke groevegebieden. In veel van die gebieden vindt men nog steeds marmer, maar dan wel met behulp van moderne werktuigen. De adertekening van het marmer in deze groeve is goed zichtbaar.



5

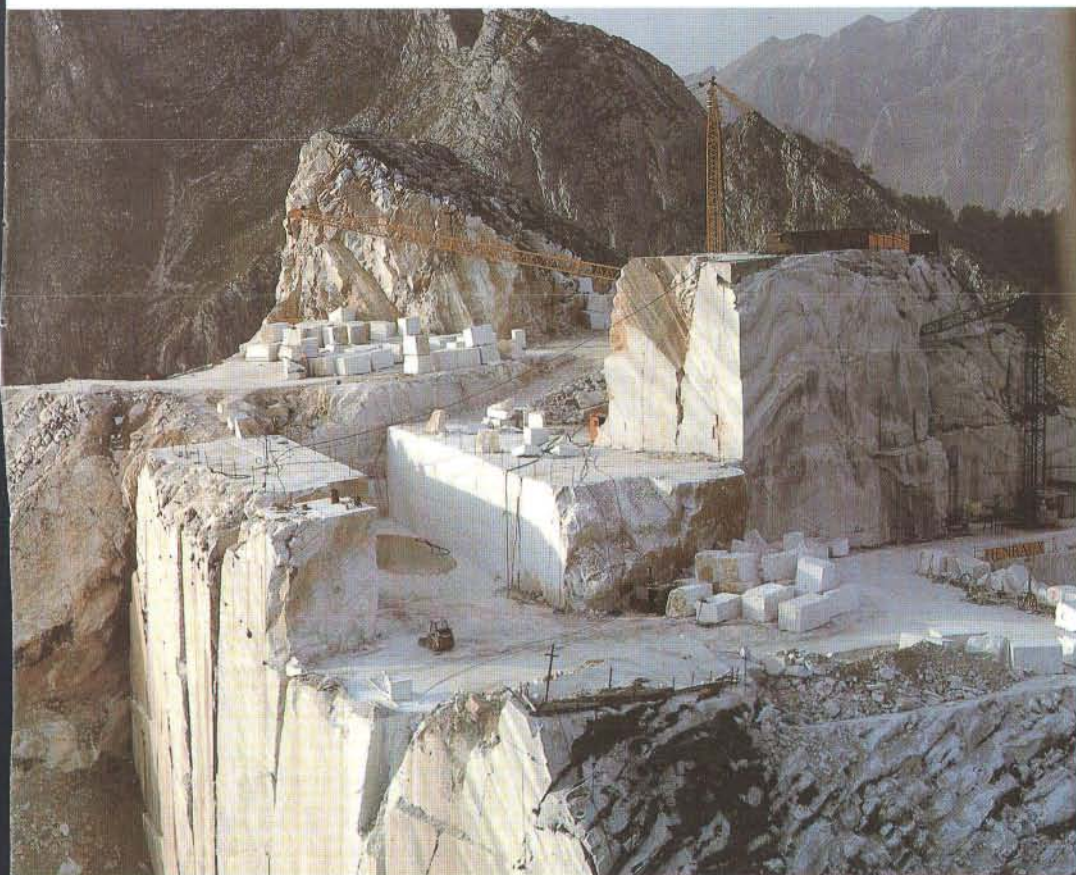


3



4





dioactief verval, zoals bijvoorbeeld lood (Pb)-isotopen. Ook in marmer ( $\text{CaCO}_3$ ) vertoont het procentueel voorkomen, ofwel de *abondantie* van  $^{18}\text{O}$  en  $^{13}\text{C}$  verschillen al naar gelang de herkomst van het materiaal. In een typisch marmerstaal uit de antieke tunnelgroeven van Paros bedraagt het isotopisch voorkomen van  $^{13}\text{C}$  1,1169‰; voor sommige stalen uit de buurt van Afyon is dat 1,1102‰. De abundantie van de isotoop  $^{18}\text{O}$  varieert in antieke marmersoorten van 0,2040‰ tot 0,2064‰. Om deze toch wel kleine verschillen weer te geven is het handiger om niet van de isotopische voorkomens zelf uit te gaan maar van hun verhouding ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  en  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ). Het werkt namelijk gemakkelijk om deze verhoudingen uit te drukken via hun verschil in promille ten opzichte van conventioneel gekozen referentiewaarden. Als referentie gelden

de waarden voor de Pee Dee Belemniet (PDB). Het *relatieve voorkomen* van  $^{13}\text{C}$ , geschreven als  $\delta(^{13}\text{C})$ , wordt dan uitgedrukt als:

$$\delta(^{13}\text{C}) = 1000 \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}}$$

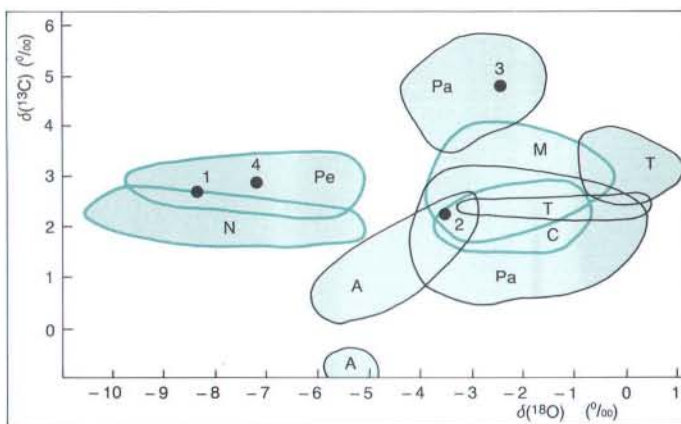
De formulering van het relatieve voorkomen van  $^{18}\text{O}$  gaat op dezelfde wijze.

De grootste verschillen in de waarden voor  $\delta(^{18}\text{O})$  en  $\delta(^{13}\text{C})$  van marmers van diverse groeven bedragen respectievelijk 12‰ en 7‰. Om in marmer de isotopische samenstelling van C en O te bepalen moet het carbonaat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) worden omgezet tot koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ) dat als gas in een massaspectrometer wordt gebracht. Door combinatie van verschillende isotopen van C en van O ontstaan  $\text{CO}_2$ -molekullen met verschillende massa's. Voor de bepaling van  $\delta(^{13}\text{C})$  en  $\delta(^{18}\text{O})$

zijn met name de massa's 44 ( $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ), 45 (vooral  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ) en 46 (vooral  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ ) van belang. Voor isotopenanalyse is niet meer dan 5 tot 10 mg marmerpoeder nodig. De techniek leent zich uitstekend voor het onderzoek van sculpturen omdat de monsterneming nauwelijks schade veroorzaakt. De resultaten van de isotopenanalyse worden verwerkt tot een twee-dimensionaal diagram (afb. 7). In dit diagram geeft elk punt het isotopisch signalement van een marmerstaal weer. De monsters van elk groevegebied blijken zich in een duidelijk afgebakend veld te bevinden.



6



7

In hoeverre levert isotopenanalyse nu voldoende informatie op om de herkomst van een marmer te bepalen? Afbeelding 7 toont aan dat de methode dit probleem niet zonder meer oplost: de velden die de belangrijkste groevegebieden karakteriseren bedekken elkaar gedeeltelijk. Slechts wanneer het isotopisch signalement van een marmerstaal ligt in een zone van het diagram dat voor slechts één groevegebied kenmerkend is, kan men dit gebied als de plaats van herkomst bestempelen.

### Chemische analyse en microscopie

Een andere manier om een marmer te karakteriseren is niet aan de hand van isotopen, maar door de chemische samenstelling van het marmer te beschrijven. Wit marmer bevat ongeveer 48% zuurstof, 40% calcium en 12% kool-

stof. Deze concentraties blijken vrijwel gelijk voor alle soorten wit marmer. Belangrijke verschillen in concentratie kan men daarom alleen verwachten voor de *nevenelementen*, dat zijn elementen met een concentratie tussen 1% en 0,1% en *spoorelementen*, waarvan de concentratie beneden de 0,1% ligt.

Om de concentratie van deze elementen te bepalen maakten de Gentse onderzoekers vooral gebruik van neutronenactiveringsanalyse (NAA, afb 13). Deze methode werkt bij zeer lage concentraties en laat tevens toe in hetzelfde monster een groot aantal elementen tegelijk

6, 7 en 8. De relatieve voorkomens van  $^{13}\text{C}$  en  $^{18}\text{O}$  geven niet voldoende informatie om de verschillende groevegebieden van elkaar te onderscheiden (7). Toch roept de herkomst van het marmer uit een beeld dat de godin Aphrodite voorstelt (7 nr. 3; 8) weinig vraagtekens op, omdat het signalement ervan in een gedeelte ligt, dat alleen het groevegebied Paros (Pa) kenmerkt. Ook een Augustusbeeld (7

nr. 4; 17) lijkt makkelijk te plaatsen. Maar de herkomst van het marmer van een grafreliëf (7 nr. 1) en van dat van een Maenade (7 nr. 2; 6) laat zich zo niet bepalen. Als marmerleverancier voor het reliëf kandideren zowel Naxos (N) als de Pentelikon (Pe), terwijl weliswaar niet Thasos (T), maar wel Marmara (M), Carrara (C), Paros (Pa) of Atyon (A) dat doen wat betreft het Maenadebeeld.

9. In marmerstalen uit de groeven van Carrara en Paros is de concentratie bepaald van 31 elementen. Sommige elementen, zoals As, Br of Ta, komen

alleen in het marmer uit het groevegebied van Carrara in voldoende mate voor, om met de gebruikte methoden te kunnen worden aangetoond.

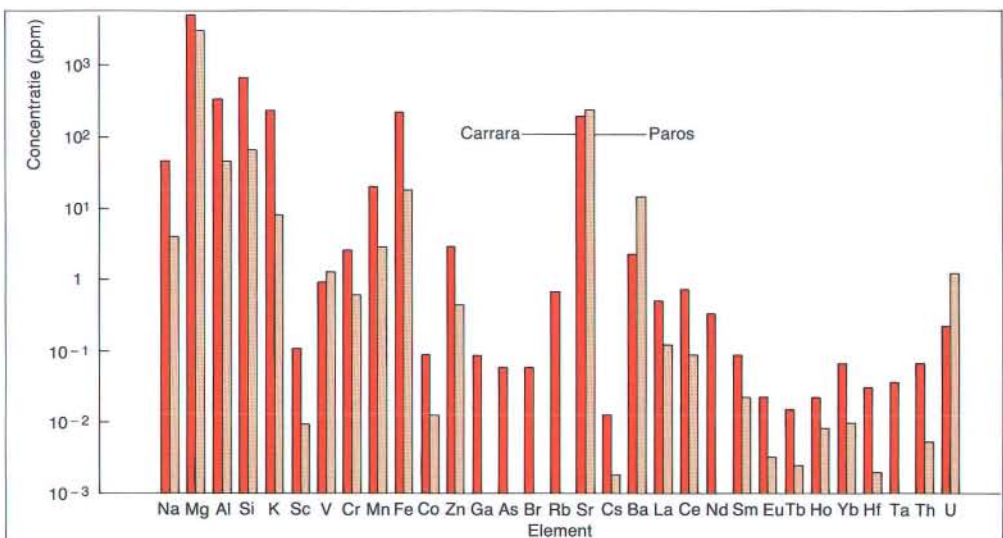




8

te bepalen. Dit verhoogt de kans op het vinden van informatie waarmee verschillende marmeren uit elkaar kunnen worden gehouden. Bij de experimenten werden cilindervormige marmerstalen met een diameter van 15 mm, een hoogte van 20 mm en een massa van 9 g gedurende 7 uur met neutronen bestraald. Dit vond plaats in de Thetis-reactor van de Rijksuniversiteit Gent, die speciaal voor NAA is gebouwd. Deze onderzoeksreactor heeft een vermogen van 250 kW en is daarmee een dwerg vergeleken met de moderne reactoren voor elektriciteitsproductie waarvan het vermogen zowat 16000 maal hoger ligt.

Door het neutronenbombardement vormen zich van de elementen isotopen die bij hun verval gamma-stralen uitzenden. De activiteit, de halveringstijd en het karakteristieke spectrum van de isotopen bevatten informatie over de identiteit en de concentratie van het bijbehorende element. Door op drie tijdstippen de gamma-activiteit te meten, één dag, één week en één maand na de bestraling, kon in eenzelfde staal van ongeveer 27 elementen nauwkeurig de concentratie worden bepaald. Met NAA kon men echter in marmer het gehalte van sommige elementen niet of onvoldoende nauwkeurig bepalen. Daarom gebeurde de concentratiebepaling met andere methoden zoals atomaire absorptiespectrometrie, titrimetrie of colorimetrie.



9

In 'onzuivere' witte marmersoorten konden al met al de gehaltes van 31 elementen worden bepaald (afb. 9). In zeer zuivere marmersoorten lagen van sommige van deze elementen de concentraties beneden de detectiegrens van de gebruikte methoden. Het bleek echter dat de analyse van een enkel element niet voldoende aanwijzingen verschaft om de verschillende marmersoorten te onderscheiden. Dit komt omdat voor ieder element de spreiding van de concentraties, gevonden voor de stalen van elk van de groevegebieden, zeer groot is. Overlappingen treden dan ook heel frequent op. Net als isotopenanalyse levert chemisch onderzoek dus belangrijke informatie zonder evenwel het probleem van de herkomst volledig op te lossen.

Als derde wijze van onderzoek kozen de onderzoekers microscopie, omdat marmers met hetzelfde uiterlijk vaak op microscopische schaal erg verschillen. Dit uit zich onder meer



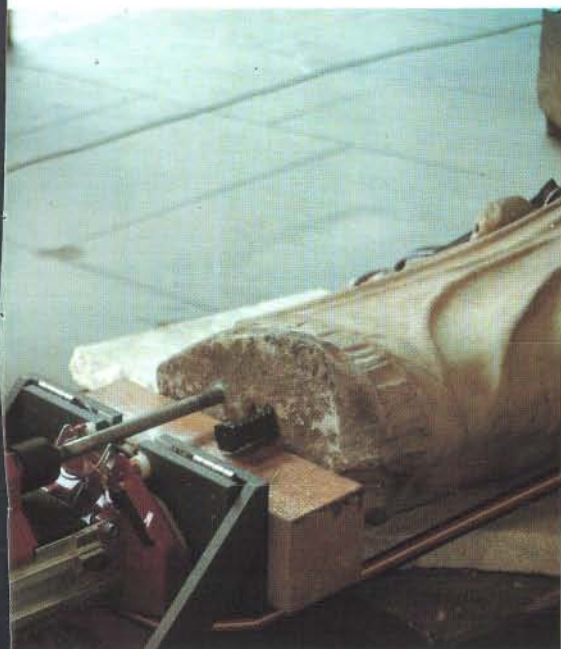
in de vorm en afmetingen van de carbonaatkorrels, de toevallige aanwezigheid van mineralen en de vervorming van de kristallen. Al deze kenmerken laten zich met de polarisatiemicroscoop makkelijk bestuderen. Daarvoor moet men over *slijpplaatjes*, dat wil zeggen marmerschijfjes van 0,03 mm dik, beschikken. Bij die dikte zijn veel mineralen doorschijnend en kunnen met behulp van rechtlijnig gepolariseerd licht aan de hand van hun optische en morfologische eigenschappen worden geïdentificeerd. Ofschoon geen enkel microscopisch kenmerk van de bestudeerde marmers een bepaald groevegebied typeert, is de maximale korrelgrootte van de carbonaten toch een relevante parameter.





### Herkomstbepaling dankzij clusteranalyse

Aangezien elk van bovengenoemde onderzoeksmethodes op zich genomen niet voldoende informatie opleverde om alle belangrijke antieke groevegebieden te onderscheiden, werden alle resultaten samengevoegd. Het aldus verkregen bestand bevatte vele duizenden gegevens, was onoverzichtelijk en alleen met krachtige computerprogramma's te ordenen. Om uiteindelijk de herkomst van marmers te bepalen pasten de onderzoekers *clusteranalyse* toe (zie Intermezzo II). Met behulp van deze rekentechniek werden de groevegebieden twee aan twee met elkaar vergeleken, waarbij men zich ten doel stelde om voor elk tweetal een stel parameters te vinden dat toeliet het marmer van die groevegebieden te onderscheiden. Dit laatste bleek inderdaad altijd mogelijk. Het hiervoor benodigde aantal parameters varieerde van 1 tot 11. Zodoende opende zich de weg



14

10 t/m 14. Bij het nemen van een marmerstaal in een museum (10) blijkt hoe het beeld in de tijd is verweerd: zie het kleurverschil tussen het beeldoppervlak en de uitgeboorde marmercilinder (11). Deze cilinder zaagt men in stukken (12), waarvan één met

neutronen wordt bestraald om zijn chemische samenstelling te bepalen. Wanneer het koelwater radioactieve straling uit het hart van de reactor afremt, ontstaat blauw licht (13). De bestraalde cilinder oogt door radioluminescentie oranje (14).

15. Onder de polarisatiemicroscopie zorgen de doorschijnende mineralen

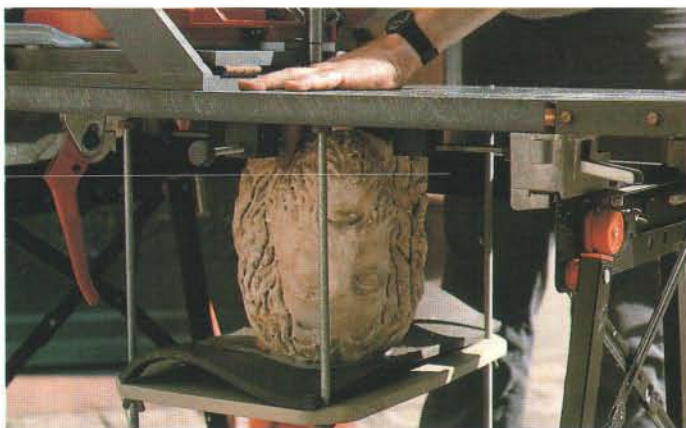
in een slijpplaatje als dit voor de schitterendste kleuren.



15

voor de herkomstanalyse van het marmer uit kunstwerken.

Een betrouwbare herkomstbepaling, steunend op isotopenanalyse, chemisch onderzoek en microscopie, vereist een marmercilinder met een diameter van 15 mm en een lengte van bijna 7 cm. Deze wordt met een gediamenteerde kroonboor uit het marmer verwijderd en verzaagd. Onmiddellijk daarna worden twee stukken, bestemd voor chemische analyse, met verdund salpeterzuur geëet. Microscopische metaaldeeltjes afkomstig van de boor en zaag verontreinigen immers het oppervlak van de cilinder. Zonder etsen zou men bijvoorbeeld in alle marmerstalen een cobalt-concentratie vinden van minstens 500 ppb. Dit is veel meer dan



16

16. Wanneer de Gentse onderzoekers marmercilinders uit de zeer kostbare beelden boren, nemen ze de grootste zorg in acht om te voorkomen dat er door de monsterneming scheuren ontstaan. Hiertoe beschikken ze over de nodige hulpmiddelen. Soms moeten ze een beeld van alle kanten stutten in een speciale werkbank, of bouwen ze er een hele stellage omheen.

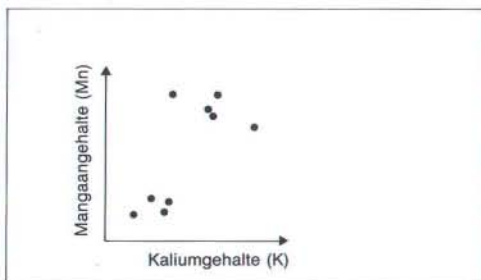
## Clusteranalyse

Stel even dat in 9 monsters van twee groevegebieden twee parameters bekend zijn. Het volledige gegevensbestand kan dan in een eenvoudig tweedimensionaal diagram worden weergegeven. Afbeelding II-1 stelt alle stalen voor als een punt waarvan de positie wordt bepaald door hun kalium (K)- en mangaan (Mn)-gehalte. De figuur laat meteen toe twee groepen van punten ofwel *clusters* te onderscheiden. Indien elke groep alle stalen van één van beide groevegebieden bevat, betekent dit dat het materiaal van die gebieden kan worden onderscheiden op grond van het K- en Mn-gehalte.

Wanneer gegevens beschikbaar zijn voor drie parameters kan ook nog een direct interpreteerbare driedimensionale voorstelling gemaakt worden maar daarmee is de limiet bereikt. De  $n$ -dimensionale ( $n > 3$ ) ruimte kan niet eenvoudig worden voor-

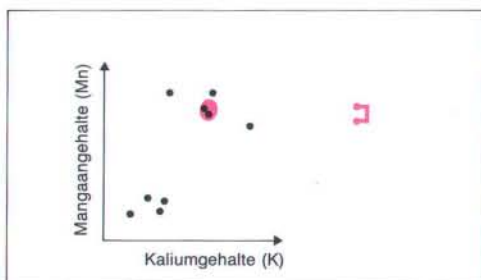
gesteld. Het is wel mogelijk om berekeningen uit te voeren voor punten met meer dan 3 coördinaten. Dit gebeurt onder meer bij de clusteranalyse. Aan de hand van het zopas beschreven tweedimensionale voorbeeld valt deze techniek te illustreren.

Eerst worden de twee punten opgezocht die het dichtst bij elkaar liggen. Hierbij kan als maat bijvoorbeeld de Euclidische afstand tussen de punten dienen. Deze afstand fungeert dus als maat voor de *dissimilariteit*, dat is het verschil tussen de monsters wat betreft de gekozen parameters (K- en Mn-gehalte in het voorbeeld). In het *dendrogram* – de figuur die de resultaten van de clusteranalyse weergeeft – worden die twee punten naast elkaar geplaatst en verbonden met een brug waarvan de hoogte een maat is voor de afstand tussen die twee punten en dus ook voor de dissimilariteit tussen de twee stalen.



II-1

II-1 t/m II-4. In marmers van twee groevegebieden zijn de gehalten van kalium en mangaan bepaald. Op de resultaten, hier verwerkt tot een tweedimensionale figuur (II-1),



II-2

kan men clusteranalyse toepassen. Als maat voor het verschil tussen twee monsters dient bijvoorbeeld de afstand tussen twee punten. Eerst neemt men de dichtst bij elkaar



wat eigenlijk in de meeste marmersoorten voorkomt. Omdat de bemonstering van kunstwerken precies zoals bij de groevestalen verloopt, zijn de analyseresultaten vergelijkbaar.

Museumconservatoren vinden het uiteraard niet prettig om een cilinder uit hun vaak bijzonder waardevolle en jarenlang gekoesterde kunstwerken te laten boren. Toch kan dit dikwijls gebeuren zonder het kunstwerk noemenswaardig te beschadigen. Een ideaal ogenblik voor de monsterneming doet zich voor wanneer een nieuwe aanwinst het museum binnenkomt of wanneer een werk moet worden geres taureerd. Meestal boort men in het kunstwerk dan gaten voor het inbrengen van metalen spil-

len. Soms kan men ook een monster nemen door een bestaande restauratie in gips of kunsthars heen en vrijwel altijd is er een plaats te vinden waar het marmer niet is bewerkt en die normaliter niet aan de blikken van het publiek blootstaat (afb. 10).

Tot nog toe werden zowat 70 kunstwerken onderzocht voor verschillende musea in Europa en de Verenigde Staten. In België en Nederland kwamen de opdrachten van de Rijksuniversiteit Gent, de Koninklijke Musea voor Kunst en Geschiedenis in Brussel en het Allard Pierson Museum in Amsterdam. Vier beeldhouwwerken waren afkomstig van privé-verzamelaars.

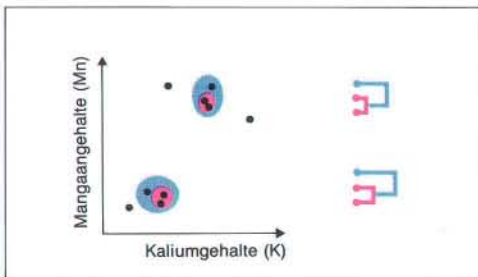
## INTERMEZZO II

Vervolgens wordt opnieuw nagegaan welke de kortste afstand is tussen twee entiteiten. Een entiteit kan nu niet alleen een punt zijn maar ook de reeds bestaande groep. Er wordt een nieuwe groep gevormd en de bewerking wordt herhaald (afb. II-2, II-3).

Een aantal opeenvolgende stappen – bestaande uit het samenvoegen van punten, groepen, of punten met groepen – resulteren in steeds grotere clusters. In het dendrogram wordt dit weergegeven door de samengevoegde entiteiten te verbinden met bruggen waarvan de hoogte, ten opzichte van de lijn waarop de punten staan, steeds toeneemt. De entiteiten die in de opeenvolgende stappen worden samengevoegd, verschillen immers meer en meer van elkaar. Het dendrogram vertoont uiteindelijk twee takken die overeenkomen met de twee clusters in het oorspronkelijke tweedimensionale diagram (afb. II-4).

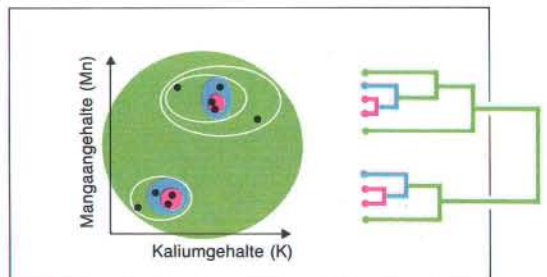
Bij de studie van marmer uit verschillende groegebieden, waarvan in de tekst een aantal is genoemd (afb. 1), zijn uiteraard tientallen parameters beschikbaar. Het zal er op aan komen om een stel parameters te vinden dat er voor zorgt dat ten eerste elk van de hoofdtakken van het dendrogram wordt bezet door de punten die overeenkomen met stalen van één bepaald groegebied en geen andere. En, ten tweede, de parameters moeten ertoe leiden dat het verschil tussen de hoofdtakken de verschillen binnen elk van deze takken zo veel mogelijk overstijgt.

Bovenstaande beschrijving is sterk vereenvoudigd. In de praktijk worden vaak nog andere criteria dan de Euclidische afstand gebruikt en er zijn ook andere methoden gangbaar voor de stapsgewijze opbouw van de clusters.



II-3

liggende punten samen tot een groep. Deze punten vormen ook de eerste brug van het dendrogram (II-2). Op dezelfde manier verbindt men punten of groepen verder met



II-4

elkaar en bouwt men het dendrogram op (II-3). Uiteindelijk zijn alle punten in clusters en door bruggen met elkaar verbonden (II-4).

## Grafrelief, Maenade en Aphrodite

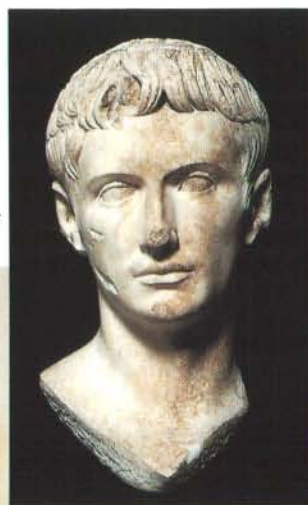
Een van de eerste kunstwerken waarop de methode werd toegepast was een fragment van een grafrelief uit een privé-verzameling in België. Het reliëf stelt een vrouwenfiguur voor en is vermoedelijk in de eerste eeuw n.C. gekopieerd naar een voorbeeld uit de late vierde eeuw v.C.. Het isotopisch signalement van het marmer laat geen eenduidige conclusie toe. Het bevindt zich in een gedeelte van het  $\delta(^{13}\text{C})/\delta(^{18}\text{O})$ -diagram waar de velden voor de Pentelikon en Naxos elkaar overlappen (afb. 7). Het marmer van deze twee groevegebieden verschilt onderling wat betreft de mangaan (Mn)- en ijzer (Fe)-concentraties en de maximale korrelgrootte van de carbonaten. Door op grond van deze parameters clusteranalyse toe te passen op de data van het grafrelief en van alle geanalyseerde stalen van de Pentelikon en Naxos, verdween de onzekerheid. Volgens het aldus verkregen *dendrogram* behoorde het kunstwerk namelijk tot de groep van de Pentelische marmers.

Over de herkomst van een Maenade-beeld uit de collectie van het Musée d'art et d'histoire te Genève was weinig bekend. Stijlkenmerken suggereerden dat het ging om een Romeinse kopie uit het begin van de tweede eeuw n.C. met als voorbeeld een vier eeuwen oudere sculptuur. Uit de isotopische samenstelling van het marmer viel weinig op te maken. Zowel de groeven van Carrara, Marmara, Paros als Afyon kwamen in aanmerking (afb. 7). Clusteranalyse steunend op chemische en microscopische kenmerken liet echter toe het marmer van deze vier gebieden te onderscheiden. De parameters die hierbij moesten worden gebruikt waren bekend. Door het marmer van de Maenade met het materiaal van deze groeven te vergelijken kon, door eliminatie, de herkomst van het marmer van het beeld worden achterhaald. Het is zeer waarschijnlijk afkomstig van het eiland Paros.

In het Musée d'art et d'histoire van Genève werden ook stalen genomen van een beeld dat de godin Venus voorstelde. Er werd algemeen aangenomen dat het om een Romeinse kopie ging uit de eerste of tweede eeuw n.C.. Het Griekse origineel van circa 400 v.C. werd als verloren beschouwd. Als kopie was het beeld niet erg waardevol en het werd daarom niet tentoongesteld maar in een opslagplaats be-

waard. In dit geval kon men wel met isotopenanalyse volstaan om de herkomst van het marmer met zekerheid te bepalen. In het isotopendiagram viel het signalement van het beeld immers in een zone waarin uitsluitend het zogenaamde 'lychnites' marmer van het eiland Paros ligt (afb. 7). Deze doorschijnende marmersoort was zo waardevol dat de anders zelfs ondergronds werden geëxploiteerd. Het Venusbeeld is dus gemaakt uit het meest zuivere marmer dat in de oudheid te koop was. Deze conclusie kwam als een aangename verrassing voor de conservator. Het gebruik van een zo unieke marmersoort zou er immers op wijzen

17



17 en 18. Clusteranalyse van alle beschikbare chemische en microscopische gegevens van marmerstalen uit Carrara en de Pentelikon en die van het monster uit een Augustusbeeld (17) wees uit dat het beeld uit Pentelisch marmer was vervaardigd.

● Carrara  
■ Pentelikon  
★ Augustus



18



dat het beeld geen Romeinse kopie is maar een Griekse kopie of misschien zelfs het origineel. Wie het museum van Genève vandaag bezoekt zal deze Venus dan ook in de Griekse zaal terugvinden onder de naam Aphrodite.

### Valse Augustus

Het probleem van de vervalsingen is een heet hangijzer in museumkringen. In sommige gevallen kunnen vervalsingen door herkomstanalyse worden opgespoord. Een vals beeld kan namelijk als dusdanig worden herkend wanneer het uit een marmersoort bestaat die niet voorhanden was op het ogenblik of de plaats waar het werk werd vervaardigd. Een voorbeeld kan dit verduidelijken. Een Cycladisch idool kan enkel gemaakt zijn uit in de prehistorie gewonnen marmer van de Cycladen. Dat een dergelijk beeld zou zijn vervaardigd met marmer van Carrara is ondenkbaar. Het marmer van Carrara exporteerde men immers pas vanaf de eerste eeuw v.C..

Een portret van keizer Augustus uit de collectie van het Musée d'art et d'histoire te Genève beschouwden sommige specialisten als vals. Het zou gaan om een produkt uit een van de vele ateliers die in de jaren twintig van deze eeuw op grote schaal sculpturen vervaardigden om de gebouwen van de fascistten te versieren. Hiervoor werd marmer van Carrara gebruikt. De analyses toonden onomstotelijk aan dat het portret uit Pentelisch marmer was gekapt. Het isotopisch signalement van het marmer wees direct in deze richting (afb. 7), terwijl de beschikbare chemische en microscopische informatie deze conclusie bevestigde. De vergelijking van deze informatie met de gegevens van alle beschikbare stalen van Carrara en de Pentelikon liet na clusteranalyse hierover geen twijfel bestaan (afb. 18). De herkomstanalyse ontkrachtte dus de stelling van diegenen die het portret als vals beschouwden. Hoewel de authenticiteit hiermee nog niet bewezen was, werd toch een extra argument voor de echtheid van het portret aangebracht.

Dit onderzoek was alleen mogelijk dankzij financiële steun van het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek te Brussel. De auteurs danken ook prof dr M. Waelkens van de KU Leuven voor zijn archeologische inbreng in dit onderzoeksproject.

### Literatuur

- Marmer in Hellas – Van steengroeve tot kunstwerk. Tentoonstellingscatalogus uitgegeven door het Gemeentekrediet van België, 1987; ISBN 90 5066 029 0.  
Herz N en Waelkens M. Classical Marble – Geochemistry, Technology, Trade. Kluwer Academic Publishers: NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences, Vol.153, 1988, ISBN 90 247 3793 1.

### Bronvermelding illustraties

Seminarie voor Griekse Archeologie, RU Gent: 154-155.  
De overige illustraties zijn afkomstig van de auteurs.



Onder redactie van ir S. Rozendaal.

# BEDILZUCHT EN DWANGMATIGE BUREAUCRATIE

De verplichte colleges marxisme-leninisme aan de Oostduitse universiteit zijn opgeheven

PAUL WOUTERS

“Bitte Dienstausweis ohne Aufforderung vorzeigen!”

Aldus het bord in het midden van de hal van het hoofdkantoor van de Academie van Wetenschappen van de DDR. Voor wie het nog niet begrijpt, zit een dame in de portiersloge, gekleed in het groene uniform van de Volkspolitie. Ze hanteert de regels onverbiddelijk: zonder pasje komt niemand het gebouw in. “De hele maatschappij opent zich, alleen de Academie verschanst zich nog”, zegt een jonge medewerkster van het roemruchte instituut. Zij en haar collega's houden het erop dat dit “stalinistische controlesysteem” binnen enkele maanden is verdwenen.

In het gebouw van de SED-leiding aan de Humboldt Universiteit is dat al het geval. Daar is het bordje met het dwingende verzoek omgedraaid. “Gelieve de deur achter u te sluiten”, staat met viltstift op de achterkant geschreven. De portier is verdwenen, het gebouw groten-deels verlaten.

Het is december 1989 in een lente-achtig Oost-Berlijn. De eerste geslaagde democratische en vreedzame revolutie in Duitsland heeft het politieke systeem binnen enkele we-

Massale demonstraties leidden vorig jaar november tot een omwenteling in de Oostduitse politiek (foto: ANP)





ken volledig omvergelopen. Onzekerheid is troef, ook in de wetenschappelijke wereld. Hoe het niet moet is duidelijk, wat er wel dient te gebeuren nog niet.

Eén resultaat staat vast: de vrijheid van wetenschap. Dat grondrecht is ook door Gregor Gysi, de nieuwe secretaris van de nog regerende Socialistische Eenheidspartij Duitsland (de SED-SDP) op het jongste congres bevestigd. De directeur voor het wetenschappelijk onderzoek van de Berlijnse Humboldt Universiteit, dr Henning Dittmar, noemt die pasverworven vrijheid de belangrijkste vooruitgang. Ook het presidium van

de Academie van Wetenschappen heeft zich ertoe bekend. In een open brief aan alle medewerkers noemt het de vrijheid van wetenschap "de voorwaarde voor een gezonde ontwikkeling van de wetenschappen in de DDR". Het betekent niet voor alle onderzoekers hetzelfde. De maatschappij- en geesteswetenschappen zullen het sterkst veranderen. Grote delen van het wetenschappelijk onderzoek moeten helemaal opnieuw worden geformuleerd. Natuurwetenschappers hadden in de inhoud van hun werk minder last van het politieke en bureaucratische systeem. Zij zien nu vooral veranderingen optreden in de omstandigheden waaronder ze moeten werken. Alle wetenschappers hebben te maken met ingrijpende wijzigingen in de organisatie van het wetenschapsbedrijf in Oost-Duitsland.

#### Formulieren

Tot op heden is het onderzoek in de DDR onderworpen aan een gedetailleerde planning. Volgens Dittmar is een wetenschapper gemiddeld een vijfde tot een kwart van de tijd kwijt aan het invullen van formulieren. Elk jaar doen de onderzoekers een voorstel. Dat gaat via de universiteit of onderzoeksinstelling 'naar boven'. Daar worden de voorstellen bediscussieerd en samengevoegd tot een plan. Dat wordt weer 'naar beneden' gestuurd. Inmiddels is het een jaarplan geworden met ministeriële autoriteit (overigens is het niet zeker dat de minister het ook heeft gelezen). Nu moet het plan themagewijs worden onderbouwd. Dat vereist weer aparte formulieren en berekeningen. Uiteraard moet ook nog verantwoording worden afgelegd over het verloop van het

onderzoek. De jaarlijkse plan-cyclus is op zijn beurt ingebed in een reeks vijfjarenplannen. In 1974 stelde de ministerraad een lange-termijnplan vast voor het fundamentele onderzoek in de wiskunde en natuurwetenschappen tot het jaar 1990. Nu geldt een vijfjarenplan dat ook alvast de periode tot de volgende eeuw meeneemt. De ministers bemoeiden zich ook met details. Zo was het de regering die bepaalde dat de discipline 'wetenschapsonderzoek' moest worden gevormd. En Günter Mittag, lid van het Centraal Comité van de SED, vond het zelfs nodig te voorkomen dat de Berliner Zeitung zelfstandig prijzen aan ingenieurs ging uitreiken.

Tot de omwenteling werd deze dwangmatige bureaucratie opgehemeld als een socialistische verworvenheid. "Door het lang van tevoren vaststellen van de doelen van wetenschap en techniek worden steeds betere voorwaarden voor de wetenschap geschapen", aldus SED-bestuurder Hörnig op een bijeenkomst van de Academie op 10 maart 1988. Nu zijn onderzoekers en bestuurders in de DDR eenstemmig van mening dat de wetenschap door dit systeem ernstig is geschaad. Professor Bernd Wilhelmi, sinds mei 1989 lid van het presidium van de Academie: "Het is te vergelijken met het lichaam. Als de grote hersenen zich in detail bezighouden met het functioneren van hart, nieren en longen, dan wordt er geen enkele gedachte meer geproduceerd." Wilhelmi is fysicus en verantwoordelijk voor alle natuurkundelinstituten van de Academie. Hij is voorstander van het streng doorvoeren van een decentralisatie van bevoegdheden. "Een regering of een Academiebestuur moet hele-





maal niet willen weten wat er dagelijks op een instituut gebeurt, wie waar aan werkt of wie naar het buitenland reist." Onderzoeksdirecteur Dittmar over de planprocedure: "Tot nu toe moesten we twee jaar van tevoren instrumenten bestellen. Met als gevolg dat we steeds achterliepen."

### Smoesjes

De bevrijding van deze bedilzucht schept voor de Oostduitse wetenschappers meer mogelijkheden collega's in het buitenland op te zoeken. Tot nu toe was het reizen aan strenge beperkingen onderhevig. Slechts een klein aantal onderzoekers, het 'Reisekader', kreeg toestemming internationale congressen te bezoeken. Om die te krijgen moest je SED-lid zijn of in ieder geval je loyaliteit aan de overheid hebben getoond, zegt dr Ulbricht, chemicus in het instituut voor fysische chemie in Berlijn. "Daardoor hebben veel collega's uitnodigingen moeten afslaan met smoesjes als 'ik ben ziek' of 'ik kan niet'. Het was erg vernederend", aldus Ulbricht.

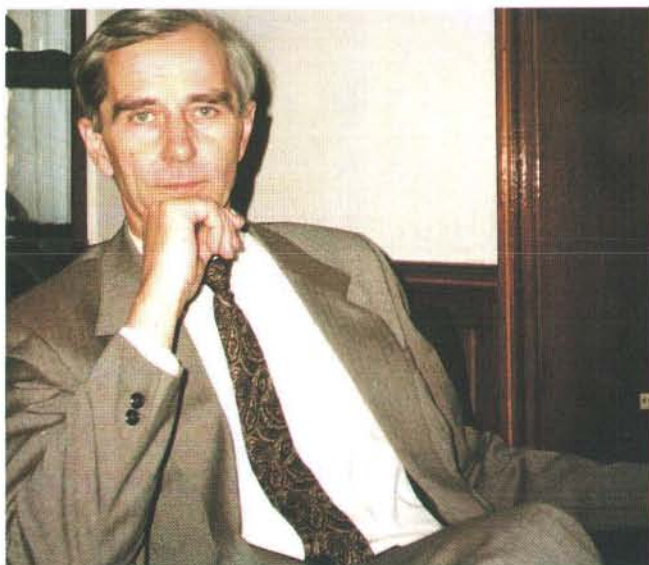
Professor Wilhelmi heeft wel internationale contacten en kon ook jonge onderzoekers uitzenden. "Maar ik moest wel voor elke uitnodiging vechten en veel bureaucratische barrières nemen", zegt hij. Binnenkort kunnen de wetenschappers zelf bepalen welke internationale contacten ze wensen te onderhouden. Directeur Dittmar daarover: "Wie onderzoeker is aan de Humboldt Universiteit heeft voortaan het recht om te reizen en contacten te leggen. Ieder ander standpunt zou onzinnig zijn."

Intussen heeft het jarenlang geldende reisverbod voor de meeste DDR-burgers inclusief de onderzoekers, wel tot gevolg dat het internationale

isolement één van de grootste problemen is voor de wetenschap in het land. Het geeft kleine problemen zoals die van Dieter, de promovendus op de rol van het moederschap in het klassieke Griekenland, die nog nooit één voet op Griekse bodem heeft gezet en alles vanaf dia's heeft bestudeerd. Het veroorzaakt echter vooral grote problemen. Onderzoekers waren gedwongen vindingen over te doen die elders al waren ontwikkeld.

### Zelfvoorziening

Dit isolement is echter ook door de westerse landen veroorzaakt. Onder leiding van de Verenigde Staten stelden zij een embargo in op het exporteren van hoogwaardige technologie naar de landen van het Warschaupact. Hierdoor kennen deze allen een flinke achterstand in de moderne techniek, vooral op het gebied van computers. De DDR heeft dit het hoofd proberen te bieden door zelfstandig een computerindustrie te ontwikkelen. Zij kan de hevi-





De Brandenburger Tor, sinds 'die Wende' symbool van de nieuwe vrijheid in Oost-Berlijn

Onder: Prof Bernd Wilhelmi (foto's Paul Wouters)



### **Een Oostduitse onderzoeker is een vijfde tot een kwart van zijn tijd kwijt aan het invullen van formulieren**

ge internationale concurrentie echter lang niet aan.

Een zojuist verschenen rapport van het economisch instituut van de Academie van Wetenschappen schat dat de DDR een technologische achterstand heeft van twee tot acht jaar. Hierdoor moeten onderzoekers in de DDR veel tijd besteden aan het bedenken en bouwen van apparaten voor experimenten (de Academie kent een instituut voor apparatenbouw met anderhalfduizend medewerkers) en aan het bedenken van con-

structies die elders vanzelfsprekend zijn.

Zoals de DDR in de techniek een beleid van zelfvoorziening heeft gevoerd, zo heeft ze dat ook in de wetenschap gedaan. Het gevolg is dat het land weinig wetenschappelijke zwaartepunten kent. "We doen eigenlijk overal aan", zegt de scheikundige Ulbricht, "en dat is voor een klein land een behoorlijk nadeel." De natuurkundige Wilhelmi is dat met hem eens. "Ons grootste probleem is dat we niet zijn

opgenomen in de internationale arbeidsdeling", zegt hij. De DDR werkt vooral met de andere landen van het Warschaupact samen, maar die hebben dezelfde of grotere problemen. "We konden onvoldoende gebruik maken van vindingen van andere onderzoekers en daardoor ontwikkelden we nauwelijks eigen gebieden van internationale allure." Wilhelmi denkt niet dat dit snel is te verhelpen. "We zullen stap voor stap projecten moeten opbouwen en ons niveau geleidelijk verhogen."

Opheffing van het isolement schept echter ook problemen. Het grote verschil in financiële middelen voor onderzoek en in salaris met de Bondsrepubliek maakt het voor wetenschappelijk onderzoekers wel erg verleidelijk om een baan in het westen te nemen als die wordt aangeboden. Het gevaar van een brain-drain is niet denkbeeldig. Hoe dat het hoofd zal worden geboden, is nog niet besloten. "Het probleem is", zegt de chemicus Ulbricht, "dat de omwenteling geen geld schept. Voorlopig worden we alleen maar armer."

Hij is bevreesd dat het vormen van joint-ventures van West- en Oostduitse bedrijven het wetenschappelijk onderzoek van de DDR op het tweede plan zal zetten. Het onderzoek in de Westduitse concerns is beter ontwikkeld en uitgerust. Het risico is reëel dat de DDR niets rest dan het toepassen van licenties op basis van Westerse vindingen. Bovendien is het onderzoek in de Academie van Wetenschappen door de overmaat aan bureaucratie relatief duur.

Onderzoeksdirecteur Dittmar verwacht juist wel een positieve uitwerking van het afsluiten van joint-ventures. Hij

verwijst naar een recent afgesloten overeenkomst met de Volkswagenstichting die vooral de beschikbaarheid van computers aan de Humboldt Universiteit moet vergroten. Hij denkt ook dat de tijdens het bezoek van de Westduitse bondskanselier Helmut Kohl afgesproken samenwerking met de Technische Universität en de Freie Universität van West-Berlijn, zijn onderzoekers zal helpen aan informatie en apparaten. Dittmar en Wilhelmi willen vooral toponderzoekers meer middelen en salaris geven, om ze op die manier voor hun onderzoeksinstellingen te behouden. "De creatiefsten moeten de meeste kansen krijgen", aldus Wilhelmi, "maar dat vereist wel dat we tegen de gelijkmakerij in dit land ingaan. En die wordt tegenwoordig onder het mom van democratie nogal eens gepreikt."

Eén van de opvallende karaktertrekken van het experimentele onderzoek in de DDR is het grote aandeel van de toegepaste research in het werk van de universiteiten en onderzoeksinstellingen. De bedrijven voeren daarentegen heel weinig onderzoek in eigen beheer uit. Ze leunen zwaar op de instituten van de Academie en de hogescholen. Deze worden door de vijfjarenplannen en de financieringsmethoden gedwongen contracten af te sluiten met de grote Oostduitse bedrijven, de 'Kombinate'.

Ook hierover heeft de vorige ministerraad een besluit genomen, om precies te zijn op 12 september 1985. Volgens die verordening vormt het financieren van onderzoek van de Academie door de Kombinate zelfs "de belangrijkste manier".

De tweede financieringsbron is de hoeveelheid projectge-

bonden middelen van het ministerie van wetenschappen en techniek. Nu is ook dit besluit maar half uitgevoerd, maar de grote afhankelijkheid van gelden van het bedrijfsleven heeft zijn sporen nagelaten. Het instituut voor fysische chemie, waar Ulbricht werkt, moet de helft van zijn inkomsten verdienen via contractonderzoek. Doordat de chemische industrie niet erg innovatiegericht is, zijn er weinig projecten die op hun beurt het fundamentele onderzoek stimuleren. "We moeten in feite alles doen wat de industrie wil, om aan die vijftig procent te komen."

Volgens Ulbricht komen volledig nieuwe projecten in grensverleggend onderzoek daardoor niet van de grond. Ook de universiteiten kennen dit probleem. Directeur Dittmar had gehoopt, zegt hij, dat de samenwerking met de grote bedrijven de universiteit minstens wat apparaten zou opleveren. Dat is echter niet gebeurd. "Het enige resultaat is dat we overmatig veel toegepast onderzoek doen, soms zelfs op routinebasis. Terwijl fundamenteel onderzoek toch de eigenlijke taak van een universiteit is."

#### Politieke wetenschappen

Het fundamentele onderzoek van de maatschappij ondergaat op dit moment een volledige gedaantewisseling. De verplichte colleges marxisme-leninisme aan de universiteit zijn opgeheven, tegelijk met het verdwijnen van de verplichte sportbeoefening. De politieke wetenschappen, die tot nog toe niet aan de universiteit konden worden beoefend – dat was immers het terrein van de SED – beginnen zich te organiseren. Er is in Berlijn al een vereniging voor politicologie opgericht. Ook de demografen hebben

een vereniging gevormd. Deze verzelfstandiging van de staat en realisering van werkelijke academische vrijheid zal geen sociale of geesteswetenschap onberoerd laten. In de publieke discussie over de toekomst van het land spelen kritische sociologen en economen een belangrijke rol. Het sociologisch instituut voert enquêtes uit om de werkelijk bestaande publieke opinie te registreren (en niet de openbare mening zoals die volgens de SED zou moeten zijn). Dittmar is er trots op dat onderzoekers van zijn universiteit in deze discussie een belangrijke rol spelen.

Tot de recente novemberrevolutie was de sociale wetenschap ondergeschikt aan het





marxisme-leninisme, geformuleerd door de SED. "Ze moest de politieke besluiten achteraf rechtvaardigen", zegt het presidium van de Academie in zijn open brief. De veranderingen in het land hebben de maatschappijwetenschappen van hun marxistische voetstuk bevrijd. Paradoxaal genoeg vond de onder-schikking van de wetenschap in de DDR namelijk plaats door haar op een voetstuk te plaatsen. De DDR is één van

de weinige landen, zo niet het enige, dat de intellectueel in haar wapen eert.

Naast de hamer van de arbeider en de korenaar van de boer prijkt de passer prominent in de vlag. Het officiële wereldbeeld dat de DDR tot nog toe had, ging ervan uit dat haar politiek wetenschappelijk kon worden gefundeerd en dat het marxisme de eenheid van de wetenschappen en die van theorie en praktijk kon vertegenwoordigen. Zo

zou dat ideaal van de zeventiende eeuwse stichter van de Berlijnse Academie, Leibniz, 'Theoria com praxi', in de DDR van de twintigste eeuw worden verwezenlijkt.

#### **Wrange ervaring**

Deze filosofie heeft niet geleid tot een bloei in de wetenschap. Wel tot het met veel omhaal van woorden en 'dialectische formuleringen' goedpraten van het officiële beleid. Alleen als het ging om het analyseren van maatschappelijke processen in de kapitalistische landen kreeg kritisch onderzoek soms een kans. Op een aantal gebieden heeft dat ook enige internationale faam verworven.

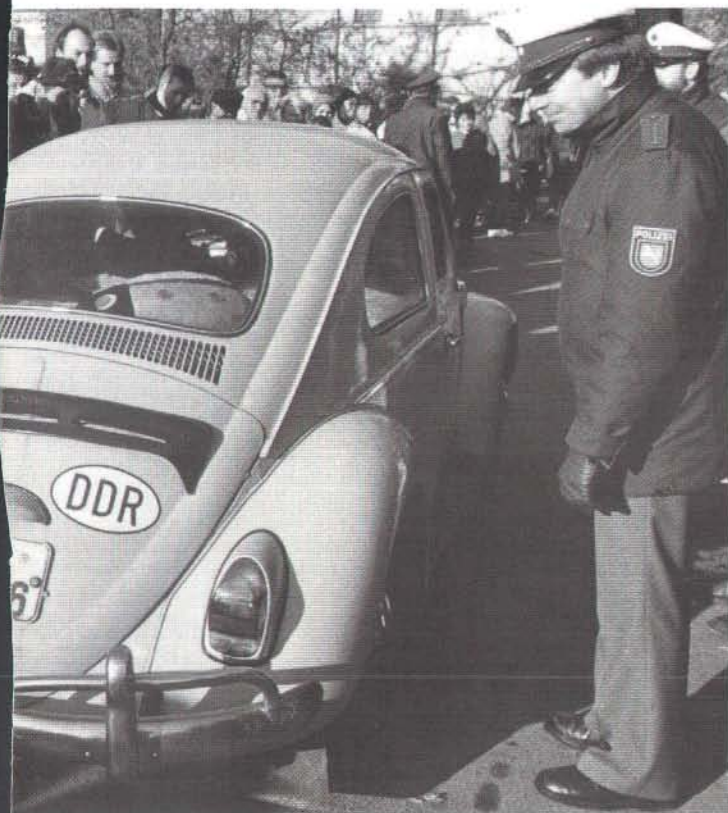
Onderzoeksdirecteur Dittmar verwacht dat er een pluriforme sociale wetenschap zal ontstaan, vergelijkbaar met die in de Bondsrepubliek. Ook zijn collega's van de sectie marxisme-leninisme van de Humboldt Universiteit redeneren in deze richting. De nieuwe directeur van die afdeling, professor Ekkhard Lassow, is van mening dat onderzoek en onderwijs niet meer uit mogen gaan van één speciale wereldbeschouwing. Zijn medewerker Malte Wiedemeyer denkt dat de filosofieafdeling uiteindelijk zal lijken op de studiums-generale aan universiteiten in West-Duitsland en Nederland.

Allen zijn het erover eens dat de politicologie een prominente plaats zal gaan innemen. En ook fundamentele kritiek op het marxisme zal voortaan aan de Humboldt Universiteit mogelijk zijn, bevestigt Dittmar.

Een kritische behandeling van het marxisme was in 1966 nu net de reden om Robert Have-

Het vrije grensverkeer zal ook de wetenschap niet onberoerd laten (foto: ANP)

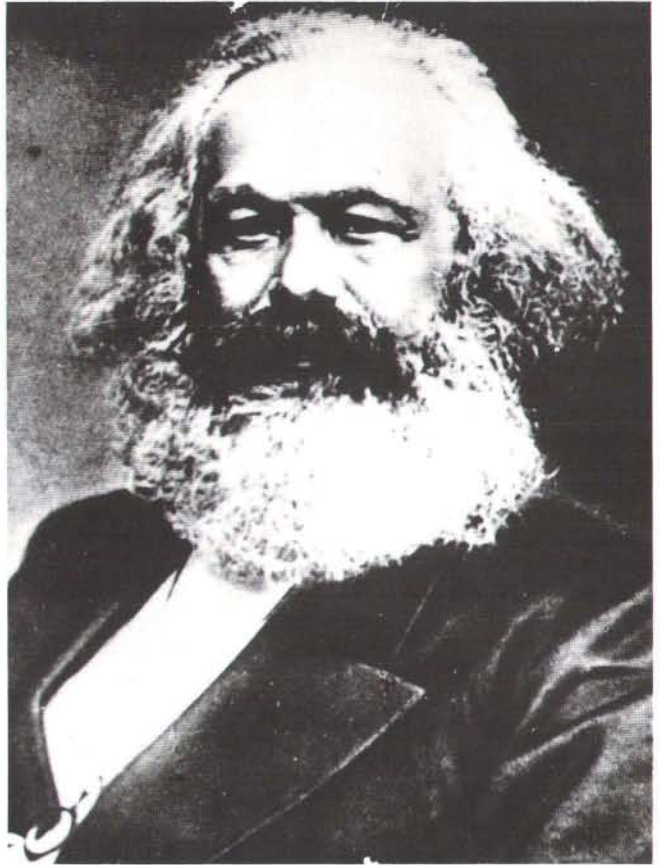
#### **Een promovendus op de rol van het moederschap in het klassieke Griekenland die nog nooit in Griekenland is geweest en alles vanaf dia's bestudeert**



mann, toen hoogleraar in de fysische chemie aan de Humboldt Universiteit en lid van de Academie van Wetenschappen, te ontslaan en politiek te vervolgen. Zijn problemen begonnen met een serie colleges (later uitgegeven onder de titel *Dialectiek zonder dogma*) die door de autoriteiten te kritisch werden geacht. Het voorstel om Havemann uit te sluiten als lid van de Academie werd ingediend door de president van dat instituut, Werner Hartke. Deze had samen met Havemann in het verzet tegen de Nazi's gezeten. Het leven van Havemann heeft vol gezeten met dit soort wrange ervaringen. Door de Nazi's ter dood veroordeeld, werd hij door het Rode Leger bevrijd. In West-Berlijn kreeg hij een beroepsverbod vanwege zijn activiteiten tegen de atoombewapening en vertrok naar Oost-Berlijn. In de DDR is hij tenslotte in volstrekt isolement gestorven (sinds 1976 had hij huisarrest). Wolf Bierman mocht in 1982 zelfs niet naar zijn begrafenis.

Inmiddels is Robert Havemann samen met de filosoof Ernst Bloch (in 1961 uit de Academie uitgesloten) postuum in ere hersteld. Het was een van de eerste daden van de Academie na de val van Honnecker. Nu wordt voor de radio uit Havemanns werk voorgelezen.

Bloch en Havemann zijn wel de bekendste, maar niet de enige mensen die te maken hadden met politieke discriminatie. Zowel aan de Humboldt Universiteit als aan de Academie zijn rehabilitatiecommissies ingesteld. Of die veel stof zullen doen opwaaien is nog niet duidelijk. Vaak was de politieke controle niet openlijk en daardoor minder grijpbaar. "In het algemeen heerste de opvatting dat



Marx en het marxisme zijn vanaf nu officieel vatbaar voor kritiek (foto: ANP)

slechts wie de juiste ideologie had, ook goede wetenschap kon bedrijven", aldus de scheikundige Ulbricht.

Wetenschappelijke kritiek kon dus dekmantel zijn voor politieke discriminatie. De rehabilitatiecommissie bij de Academie behandelt ook klachten over zittende leden. In vlugschriften die op het discussiebord van de Academie zijn opgeprikt, is al geëist dat de benoemingen van de laatste jaren nog eens kritisch worden bekeken. Er zouden ook politieke benoemingen zijn voorgevallen die weten-

schappelijk niet zijn te verdedigen.

Het hoofd van de afdeling voorlichting van de Academie, dr Herbert Wöltge, denkt dat dit "geen werkelijke discussie" zal worden. Het enige dat hem invalt zijn de erelidmaatschappen van de inmiddels gevangen gezette SED-bestuurders Erich Honnecker, Günter Mittag en Kurt Hager. Die zijn inmiddels ingetrokken. Professor Bernd Wilhelmi denkt dat de leden van de Academie competente wetenschappers zijn. Voor de natuurkundigen staat hij in ieder geval in. "In de eerste plaats werd bekeken of iemand een goed fysicus was. Daarna speelde vermoedelijk



ook een rol hoe een persoon zich opstelde tegenover de problemen van de maatschappij", aldus Wilhelmi. Hij voegt er aan toe dat hij pas sinds mei in de Academie zit en dus niet alles over het verleden weet.

Deze discussie over de samenstelling van het plenum van de Academie, de beslissende vergadering, is slechts één element in het debat over dit instituut. Boven de trap in het hoofdkantoor hangt in grote letters de vraag "Hoe verder met de Academie?" Daaronder hangt de open brief van het presidium. De meningen hebben zich nog niet definitief gevormd, de discussie is eigenlijk net begonnen.

Deze beslist niet over zomaar een stelletje geleerden. De Berlijnse Academie is één van de oudste wetenschappelijke instituten in Europa. Leibniz stichtte haar in 1700 als de Brandenburger Sociëteit van Wetenschappen in Berlijn. Beroemde namen als Euler, Gauss, Kant, Lagrange, Mitscherlich, von Helmholtz, Koch, Planck, Einstein en de gebroeders Grimm zijn met haar geschiedenis verbonden. Na de bevrijding van Hitler en de deling van Duitsland is de Academie op bevel van de commandant van het Russische leger heropgericht als de Duitse Academie van Wetenschappen in Berlijn. Sinds die tijd heeft ze zich ontwikkeld tot de alomvattende onderzoeksorganisatie in de DDR. Ongeveer 350 wetenschappers zijn lid en kunnen in het plenum meebeslissen. De Academie beheert bijna zestig onderzoeksinstituten met meer dan 23.000 medewerkers. Dit gigantische apparaat moest er onder andere voor zorgen dat de wetenschap zich volgens het plan van de SED zou ontwikkelen.

Het presidium heeft sinds 'de Wende' de onafhankelijkheid afgekondigd. Bovendien wil het de twee aspecten van de Academie, onderzoeksorganisatie en geleerdenvereniging, meer van elkaar scheiden, zij het nog binnen één verband. De instituten van de Academie zullen zelfstandiger functioneren. Overal worden wetenschappelijke raden gevormd die garant moeten staan voor democratische besluitvorming binnen elk instituut. Welke taken de overkoepelende Academie zal krijgen, staat in het geheel niet vast. Zelfs de volledige desintegratie van de Academie is een mogelijkheid waarmee de onderzoekers rekening houden.

Wilhelmi zou dat niet toezien omdat dan het gevaar dreigt dat de instituten nog slechts contractonderzoek zullen doen. De scheikundige Ulbricht vraagt zich daarentegen vooral af of de DDR zich nog langer "zo'n waterhoofd" als de huidige Academie kan veroorloven. Hij is bovendien van mening dat het huidige presidium moet aftreden. Het heeft weliswaar op 7 december het vertrouwen gekregen van het plenum (met uitzondering van de verantwoordelijke voor de sociale wetenschappen), maar dat leek zijns inziens wat teveel op een wassen neus.

In januari wordt een nieuw ontwerp-statuuut van de Academie gepubliceerd. De discussie zal tot en met maart duren. Dan moet de grootste verandering sinds de Tweede Wereldoorlog in dit roemruchte instituut zijn beslag krijgen. Een soortgelijke hervorming vindt dan plaats aan de Humboldt Universiteit. Tot die tijd is niemand zeker van zijn zaak.

**NATUUR EN TECHNIEK** verschijnt maandelijks, uitgegeven door de Centrale Uitgeverij en Adviesbureau BV te Maastricht.

Redactie en administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland:

Postbus 415, 6200 AK Maastricht.

Telefoon: 043-254044.

Fax: 043-216124.

Voor België:

Boechtstraat 15, 1860-Meuse.

Telefoon: 00-3143254044.

Fax: 00-3143216124.

Bezoekadres:

Stokstraat 24, Maastricht.

Advertenties:

R.A. Bodden-Welsch,

tel.: 043-254044.

De Centrale Uitgeverij is ook uitgever van de CAHIERS BIO-WETENSCHAPPEN EN MAATSCHAPPIJ.

Abonnees op Natuur en Techniek en studenten kunnen zich abonneren op deze cahiers (4 x per jaar) voor de gereduceerde prijs van f. 25,— of 485 F.

Abonnementsprijs (12 nummers per jaar, incl. porto): f. 112,50 of 2200 F. Voor drie jaar: f. 265,— of 5195 BF. Prijs voor studenten: f. 85,— of 1660 F.

Overige landen: + f. 35,— extra porto (zeepost) of + f. 45,— tot f. 120,— (luchtpost).

Losse nummers: f. 10,95 of 215 F (excl. verzendkosten).

Distributie voor de boekhandel:

Betapress BV, Gilze. Tel.: 01615-7800.

Abonnementen op **NATUUR EN TECHNIEK** kunnen ingaan per 1 januari of per 1 juli, (eventueel met terugwerkende kracht) doch worden dan afgesloten tot het einde van het lopende abonnementsjaar.

Zonder schriftelijke opzegging vóór het einde van elk kalenderjaar, wordt een abonnement automatisch verlengd voor de volgende jaargang. TUSSENTIJDEN kunnen geen abonnementen worden geannuleerd.

Postrekeningen:

Voor Nederland: nr. 1062000 t.n.v.

Natuur en Techniek te Maastricht.

Voor België: nr. 000-157074-31

t.n.v. Natuur en Techniek te Brussel.

Bankrelaties:

Voor Nederland: AMRO-Bank NV te

Heerlen, nr. 4.82.00.015.

Voor België: Kredietbank Brussel,

nr. 437.6140651-07.



## PRIJSVRAAG

### Oplossing december 1989

De afgelopen jaargang beleefde een explosief slot wat betreft de prijsvraag. De professor raakte bedolven onder de voornamelijk goede inzendingen. Veel nieuwe puzzelaars dienden zich aan, waarvan de naam, adres en puntenaantal in de computer moesten worden opgeslagen. De professor verwacht dat de laddercompetitie nu in alle hevigheid zal losbarsten. Wel moeten de nieuwelingen eerst nog de voorhoede achterhalen, die de nieuwe jaargang inging onder leiding van Ivo Paulus uit Heverlee. Met 85 punten wint hij een gratis jaarabonnement op *Natuur en Techniek*. Uit de uitpuilende map van goede inzendingen kwam die van Koen de Wilde uit Wetteren als de winnende te voorschijn. Hij mag een boek uit de Wetenschappelijke Bibliotheek van *Natuur en Techniek* kiezen vanwege zijn goede antwoord: na 1989 seconden komt de stip in het punt (44, 35) aan. Velen vonden, in navolging van de professor, dit punt met behulp van een computerprogramma. Ook zonder zo'n hulpmiddel is dit punt te achterhalen. Bewegend over het Oxy-vlak raakt de stip de x-as in:

(1,0), (3,0), (5,0), ...

na het volgende aantal seconden:

$1^2, 3^2, 5^2, \dots$

Op de y-as raakt zij de punten

(0,2), (0,4), (0,6), ...

na,  $2^2, 4^2, 6^2, \dots$  seconden.

Het getal  $1989 = 44^2 + 53$ . Inzichtig het vaste patroon dat de weg van de stip kenmerkt, ging de stip dus vanaf het punt (0, 44) nog 44 naar rechts en daarna 9 naar beneden.

### De nieuwe opgave

De professor doet deze maand enkele proeven in zijn laboratorium. Daar heerst tenminste de geriefelijke temperatuur van  $25^\circ\text{C}$ . Met behulp van jodometrische titratie tracht hij het oplosbaarheidsprodukt van koper(II)jodaat,  $\text{Cu}(\text{IO}_3)_2$ , te bepalen. Daartoe voegt hij aan  $20,0 \text{ cm}^3$  van een verzadigde oplossing van koper(II)jodaat een overmaat jodide toe. Vervolgens titreert hij met  $30,0 \text{ cm}^3$   $0,100 \text{ M}$  natriumthiosulfaatoplossing ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ). Geef de vergelijkingen van de bijbehorende reacties en bereken de koper(II)concentratie in de oorspronkelijke verzadigde oplossing. Wat is het oplosbaarheidsprodukt  $K_s$  (vermeld ook de eenheid) van koper(II)jodaat?

De inzenders die deze drie vragen

van de professor goed beantwoorden maken kans op de lootprijs, een boek uit de Wetenschappelijke Bibliotheek van *Natuur en Techniek*. Tevens vermeerderen zij zo hun totale aantal punten met zes, waarmee ze meedingen in de laddercompetitie. Trouwe inzenders die goede antwoorden leveren bereiken langzamerhand de top van deze competitie en verdienen dan een gratis jaarabonnement op *Natuur en Techniek*. Oplossingen van deze opgave, die de organisatie van de Nederlandse Chemie Olympiade beschikbaar stelt, moeten uiterlijk dinsdag 13 maart op de puzzelredactie zijn.

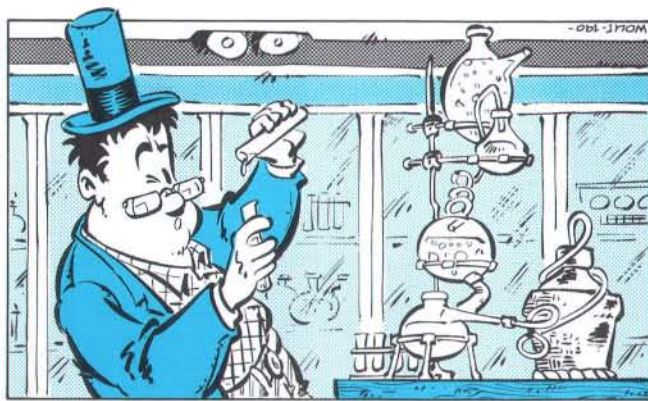
Adres:

*Natuur en Techniek*

Prijsvraag

Postbus 415

6200 AK Maastricht



### Rectificatie: Tanford-grafieken

Bij de afbeelding linksonder op bladzijde 11 in het januarinum-mer van *Natuur en Techniek* ontbreekt het bijschrift. Bovendien is de afbeelding abusievelijk aangeduid als II-1, maar dat had II-3 moeten zijn. Het nummer II-1 hoort bij de structuurmodellen te staan. De verwijzingen in de tekst en in tabel II-1 naar de Tanford-grafieken van afbeelding II-3 kloppen wel. Het bijschrift luidt:

II-3. Uit deze Tanford-grafieken van verschillende polymeren blijkt dat de calciumbinding toeneemt bij een verlaging van de bezettingsgraad, door een toenemende molekuulgrootte of door een vergroting van de dichtheid aan bindingsplaatsen, zoals op de co-polymeerketen.

De redactie biedt de lezers van *Natuur en Techniek* en de auteur van het artikel *Fosfaatvrij-Ver-vangers op een rij*, Dr. F.L.M. Smeets van het Unilever Research Laboratorium te Vlaardingen, haar excuses aan voor deze verve-lende ommissie.



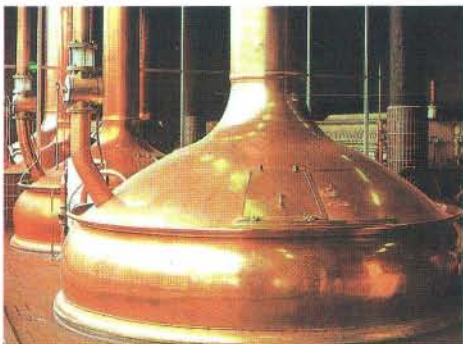
# VOLGENDE MAAND IN NATUUR EN TECHNIEK

## Fourieranalyse

Dr N. Nieland

Het onderzoek naar kristalstructuren, hartafwijkingen, de aardkorst en de menselijke spraak zou volstrekt onmogelijk zijn zonder de Fourieranalyse. De

Franse wiskundige Fourier (1768-1830) is de grondlegger van een analytische methode, die niet meer weg te denken is uit de wetenschap en de natuurwetenschappen.



## Bier

Dr D. De Keuleleire

Bij het brouwen van bier ontwikkelen zich de smaak en het aroma, die we te danken hebben aan een fijn chemisch samenspel van bitterstoffen en geurcomponenten. Na consumptie door de mens worden alle ingrediënten afgebroken en omgezet. Achter een glas bier gaat subtiele chemie schuil.

## Oud Graan

Prof dr C. Bakels

De teelt van graan blijkt de algemene bestaansbasis te zijn van de meeste Hoge Culturen. In zulke culturen konden groepen mensen vrijgesteld worden van de voedselproductie om iets anders te doen. Essentieel daarvoor was dat de anderen in de gemeenschap een voedseloverschot konden produceren.



## Papier

Bruno Ernst

Een aanzienlijk deel van ons op papier vastgelegde cultuurbezit gaat voor altijd verloren. Miljoenen boeken zijn door verzuring al zo bros geworden, dat men ze niet meer kan raadplegen zonder dat het papier scheurt of verpulvert. De verzuring is het gevolg van het productieproces, maar de vervuiling helpt een handje mee.

## Ethyleen

Drs L. Voesenek,  
Dr F. Harren en  
Ing E. Woltering

Alle planten produceren ethyleen. Zelfs kleine hoeveelheden van dit gasvormige plantenhormoon leiden tot een veelheid aan reacties in een plant. Een uiterst gevoelige, lasergestuurde meettechniek maakt het mogelijk de zeer geringe natuurlijke ethyleenafgifte van planten te registreren.



## Post

Ir Th. Snellen en  
W. Klein

De postcode, gebruik hem goed. Maar hoe wordt de code precies gebruikt bij de automatische sortering van post? Tijdens de auto-

matische verwerking van poststukken wordt de postcode gelezen en omgezet in een binair getal. Aan de hand van dit getal vindt de uiteindelijke sortering plaats en vindt het poststuk zijn weg.

## Sommige Aardwetenschappers drinken uitsluitend bronwater zonder prik. Overigens zijn dat er niet veel.

*Vraagje: zijn wij het nou die voor die overmaat aan CO<sub>2</sub> in de atmosfeer zorgen, of helpt de aarde zelf een handje mee?*

Voor doemdenkers is het moment zeer nabij dat de zeespiegel zover is gestegen dat het water eenvoudig over onze dijken gutst. Omdat de ijskappen smelten als gevolg van een overmaat aan CO<sub>2</sub> in de atmosfeer. Zou het?

Als je op onze **Open Dag Aardwetenschappen** komt, leggen we je precies uit dát dat een reëel scenario kan zijn. Maar dat het waarschijnlijk ook anders kan zijn.

Een aardwetenschapper is namelijk redelijk eigenwijs. Hij, of zij, laat zich vooral leiden door feiten en cijfers en weinig door veronderstellingen van anderen.

Je moet dus de aardkorst en de oceanen gaan bestuderen. Graven in het verleden. Verbanden leggen tussen klimaatsveranderingen en het CO<sub>2</sub> gehalte. Pas als daar duidelijkheid over is, kun je gefundeerd maatregelen voorstellen. Dat is niet alleen razend interessant om te doen, je komt ook nog eens ergens want de héle wereld is in feite je werkterrein.

Waarmee wij ook willen aangeven dat dit een studie is met het perspectief van een zekere toekomst. Want de zorg voor het milieu neemt alleen maar toe. En in de toekomst hebben we steeds meer olie nodig en gas en goed drinkwater. Ook dat is werk voor een geoloog of fysisch geograaf.

Dat leer je op de VU.

Op zaterdag **17 maart** organiseren wij een Open Dag. En als je het echt in de praktijk wilt beleven: ga dan mee met onze **1-daagse excursie** dwars door het Westen van Nederland. Ook gratis en geheel verzorgd.

Dat is op zaterdag **31 maart**.

Neem je kennis van de exacte vakken onder je arm en kom naar de VU. Praten we daar verder over de toekomst. De jouwe.

## De aarde biedt volop toekomst.

Studiesecretariaat Aardwetenschappen.

Vrije Universiteit

De Boelelaan 1085

1081 HV Amsterdam

Tel. 020-548 2451

vrije Universiteit



amsterdam